



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITŮ S PŘÍRODNÍMI VLÁKNY A VLIV NA JEJICH VLASTNOSTI

MANUFACTURING TECHNOLOGY OF NATURAL FIBRE COMPOSITES AND INFLUENCE ON THEIR
PROPERTIES

HABILITAČNÍ PRÁCE

HABILITATION THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.

BRNO 2024

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 potenciál 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 obroběných dílů, kde metody plánovaného experimentu a statistického vyhodnocení umožnily identifikovat optimální parametry pro rezné síly a drsnost povrchu. Výsledky této práce poskytují důležitý přínos pro vývoj udržitelných materiálů a technologií v oblasti kompozitů a nabízí nové možnosti pro průmyslové aplikace, a tedy spolupráci FSI VUT v Brně s praxí.

Klíčová slova

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

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.

Key words

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

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto zejména své rodině za podporu a obětavost, také kolegům na ústavu strojírenské technologie a dalším na FSI VUT v Brně za podporu, cenné rady a výpomoc při realizaci experimentů a jejich zpracování.

Poznámka:

Protože některé pojmy odborné termíny či názvy související s touto tematikou, pocházející ze zahraničních zdrojů jsou velmi obtížně přeložitelné do českého jazyka, je pro účely této práce v těchto případech použito rovněž originální terminologie. Rovněž obrázky převzaté a citované ze zahraniční literatury jsou v originálním znění.

OBSAH

ABSTRAKT.....	2
ABSTRACT.....	2
PODĚKOVÁNÍ.....	3
OBSAH.....	4
1 ÚVOD.....	6
2 TEORETICKÉ ZÁKLADY OBORU KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	9
2.1 Mechanika kompozitů.....	12
2.2 Paradox vláknité struktury.....	20
2.3 Únavové chování laminátu.....	20
2.4 Reakce kompozitu na okolní prostředí.....	21
2.5 Materiály výztuže.....	22
2.5.1 Skelná vlákna.....	25
2.5.2 Uhlíková vlákna.....	26
2.5.3 Aramidová vlákna.....	27
2.5.4 UHMWPE (Ultravysokomolekulární polyethylen).....	28
2.5.5 Čedičová vlákna (Basalt fibers).....	28
2.5.6 Přírodní rostlinná vlákna.....	29
2.5.7 Ostatní vlákna.....	30
2.6 Používané matrice.....	30
2.6.1 Epoxidové pryskyřice.....	31
2.6.2 Polyesterové pryskyřice (UP-R).....	34
2.6.3 Vinylesterové pryskyřice (VE).....	34
2.6.4 Fenolické pryskyřice – fenolformaldehydové (PF).....	35
2.6.5 Kyanoestery (CE).....	35
2.6.6 Bismaleimidy (BMI).....	35
2.6.7 Speciální pryskyřice.....	36
2.6.8 Termoplastické matrice.....	36
2.7 Technologie výroby kompozitních materiálů.....	37
2.7.1 Mokré kladení.....	38
2.7.2 Resin transfer technologie.....	40
2.7.3 Kladení prepregů.....	43
3 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ – KOMPOZITY S PŘÍRODNÍMI VLÁKNY.....	48
3.1 Přírodní vlákna.....	50
3.2 Úprava vláken.....	54
3.3 Výrobní technologie kompozitů s přírodními vlákny.....	56
3.4 Testování mechanických vlastností kompozitních materiálů.....	59
3.5 Vady a poškození kompozitů.....	61
3.5.1 Pórovitost.....	62
3.6 Charakteristika poškození kompozitních dílců a metody detekce.....	64
3.7 Nedeformační metody zkoušení kompozitů.....	67
3.7.1 Vizuální kontrola.....	68

3.7.2	Kontrola poklepem	69
3.7.3	Ultrazvuková kontrola	69
3.7.4	Termografické zkoušky	69
3.7.5	Radiografické zkoušky	70
3.7.6	Počítačová tomografie a mikro tomografie	70
3.7.7	Elektromagnetické zkoušky.....	72
3.7.8	Kontrola pomocí akustické emise (AE).....	72
3.7.9	Smyková zkouška	73
3.7.10	Skenovací elektronová mikroskopie (SEM).....	73
3.8	Vibrace a utlum KPV	74
3.9	Obrábění kompozitních materiálů s přírodními vlákny.....	76
4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	78
4.1	Ověření mechanických vlastností za různých podmínek	78
4.1.1	Výroba vzorků	78
4.1.2	Analýza pórovitosti.....	85
4.1.3	Mechanické vlastnosti KPV - pevnost.....	96
4.1.4	Pevnostní testy po testu nasákavosti.....	104
4.2	Frekvenční charakteristika a útlum hluku KPV	110
4.3	Obrábění kompozitu se lněnými vlákny.....	115
4.3.1	Stanovení cílových parametrů měření a cílů experimentu	115
4.3.2	Přípravy měření	115
4.3.3	Plánování experimentu – DOE	117
4.3.4	Statistické vyhodnocení DOE.....	121
5	PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI	129
	ZÁVĚR.....	130
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	132
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	156

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 vahou 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 je 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 čím dál více v prototypch nových a zkoumá jejich potenciál [2]. V oblasti motorsportu (FIA) a jachtingu (World sailing) dvě celosvětově největší sportovní federace ustanovili 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, rámců jízdních kol, okenních rámců, sportovního vybavení atd. [4]. Uplatnění nachází v automobilkách jako Mercedes-Benz, Ford, Toyota, BMW a mnoho dalších 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 využití bio-kompozitních vláken v masovém měřítku. Využití lze také nalézt v motosportu kde jedním z prvních průkopníků je firma Porsche motorsport, která vyrobila šasi závodního speciálu Cayman [6], viz obr. 1.1, nebo projekt sedačky McLaren určeným pro vozy F1 [7].



Obr.1 Lněné šasi závodního Porsche Cayman [6].

V dalších aplikacích se lze setkat s využitím ve stavebnictví, kde jsou rozšířené různé panely jak pro dekorativní účely, tak pro své unikátní vlastnosti, jako jsou tlumení vibrací. Jedním z významných trhů jsou panely tepelné izolační panely, kde je velmi strmý rozvoj [8]. V oblasti letectví materiály narazí na legislativní proces certifikace a přísné normy, které definují vlastnosti materiálů zejména v oblasti samozhášivosti, dýmání atd. Jiné kompozity zejména uhlíková a skelní vlákna jsou zde již rozšířená, přírodní ale díky své nízké specifické hmotnosti jsou 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 léty zavedeny materiál skelné vlákno s polyesterovou maticí, zejména v posledních letech, kdy již dosluhují první vyrobené strukturální trupy ze 60–70. let 20. století se ukazuje jako problém jejich recyklace a bezpečná likvidace, jak na souši, tak ve vodním prostředí v případě havárie. Zde 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 nábytků 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, nízká odolnost proti nárazu a nízká tepelná stabilita. 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 vychází 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 spolupráce s průmyslem.

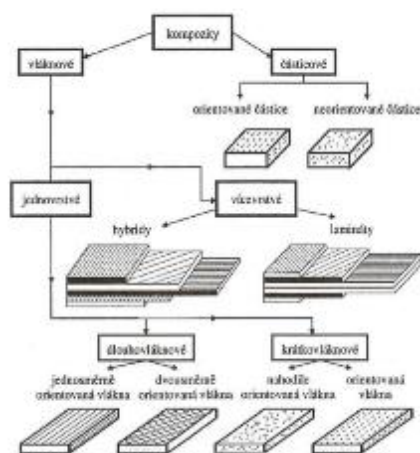
V rámci hodnocení a výzkumu jednotlivých parametrů kompozitů s přírodními vlákny a hybridních kompozitů, je oblast testování velmi rozsáhlá a lze ji zkoumat velmi detailně za využití mnoha experimentů, tyto jsou v jednotlivých kapitolách nastíněny u testů hlavních parametrů, tak aby bylo možné sestavit v první fázi komplexní model chování těchto kompozitů.

Experimenty zde uvedené byly realizovány v průběhu několika let a odráží znalosti v dané době, data jsou platná a lze na nich dále stavět za použití nových materiálů a technologií.

2 TEORETICKÉ ZÁKLADY OBORU KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Kompozitními materiály rozumíme v tomto textu takové materiály, které jsou tvořeny nosnou výztuží a základním materiálem (matrice). Výztuž dodává materiálu unikátní vlastnosti, kterými se budeme zabývat dále, úlohou základního materiálu je vázat výztuž a přenášet zatížení mezi prvky výztuže. Materiálem výztuže i matrice mohou být jak kovy, keramika, tak nekovové organické či neorganické materiály ve formě keramiky nebo polymerů. Podle formy výztuže se kompozity dělí na částicové, vláknové a skeletové. Vícevrstvé dlouho-vláknové kompozity se označují jako lamináty.

Částicové kompozity jsou tvořeny částicemi rozptýlenými v matrici v orientované formě nebo nahodilě. S těmito se nejčastěji setkáváme ve formě vstříkovaných plastů nebo ve stavebnictví (beton). Částice obsažené v kompozitu obecně zvyšují jeho mechanické vlastnosti.



Obr. 2.1 Rozdělení kompozitních materiálů [15].

Vláknové kompozity lze dělit z hlediska délky vláken na krátkovláknové a dlouhovláknové. Krátkovláknové rozumíme pro podmínku ($l/d < 100$), dle orientace na uspořádané (orientované) a neuspořádané (nahodilé), obr. 2.1. Dlouhovláknové kompozity lze dělit na jednovrstvé a vícevrstvé. Vícevrstvé kompozity, pokud obsahují stejná, pouze jinak orientovaná vlákna, nazýváme lamináty. Pokud je kompozit tvořen vrstvami z různých materiálů, hovoříme o něm jako o hybridním kompozitu. Jednovrstvé kompozity, obsahující náhodně orientovaná vlákna, lze dělit dle délky vláken, a to na sekaná vlákna (chopped) a dlouhá vlákna náhodně umístěná (rohože – mat, non-woven). Proces výroby těchto kompozitů ovšem může probíhat po vrstvách, tyto kompozity vykazují téměř izotropní vlastnosti. Orientovaná vlákna rozdělujeme na jednosměrná a vícesměrná orientovaná a tkaniny. Z praktického hlediska jsou nejvíce využity jednosměrné, biaxiální a splétané tkaniny, jejich formy budou probrány dále.

Hlavním rozdílem u laminátů oproti klasickým materiálům (kovy, polymery) je jejich anizotropní chování. Jejich mechanické vlastnosti jsou určeny orientací vláken a lamináty se chovají odlišně při zatěžování ve směru vláken nebo kolmo na ně. Při vhodném použití laminátu jako konstrukčního materiálu lze díky těmto vlastnostem v některých případech docílit snížení hmotnosti při zachování nebo i zvýšení pevnosti dílu [15] [16] [17].

Složení kompozitních materiálů a hmotná vlákna nelze použít jako konstrukční materiál, protože nepřenáší tlakové napětí a nedrží stálý tvar. Proto je vlákna nutné kombinovat s matricí – výplní.

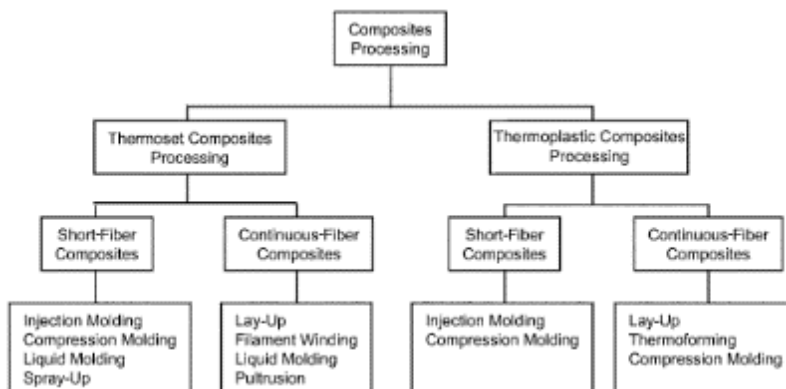
Funkce vláken/výztuže:

- nesou zatížení,
- zajišťují vysokou pevnost a tuhost kompozitu – mají vyztužující účinek,
- dlouhá vlákna mají významnější vyztužující účinek než krátká vlákna.

Funkce matrice/výplně:

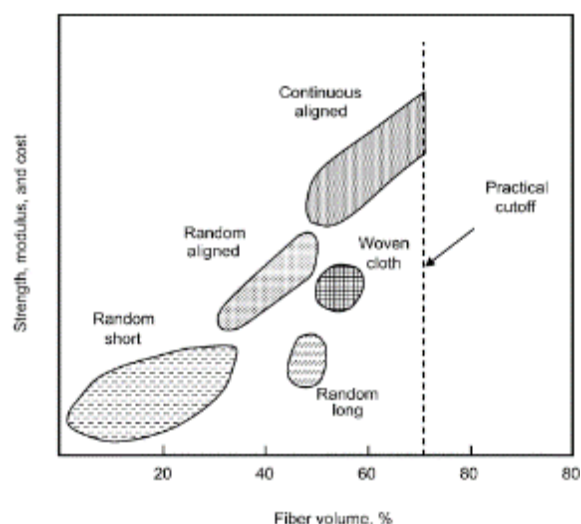
- drží vlákna pohromadě, zajišťuje tvarovou stálost výrobku,
- přenáší vnější namáhání na vlákna,
- chrání vlákna před vnějšími vlivy – abrazivní poškození, vlivy prostředí, vlhkost,
- má vliv na vlastnosti kompozitu (teplotní a chemická odolnost, odolnost proti stárnutí, elektrické vlastnosti, smrštění při vytvrzování).

V dalším textu se budeme zabývat vlákny vhodnými pro konstrukční aplikace a výhodnými pro svou vysokou tahovou pevnost (uhlíková, skelná, aramidová atd.), dále polymerními matricemi – termosetovými i termoplastickými. Náhled pro využití různých typů vláken a matric na výrobu je uveden na obrázku 2.2.



Obr. 2.2 Nejrozšířenější typy výztuží a matric s jejich výrobními metodami [15].

Vliv výztuže a matrice na vlastnosti kompozitu lze hodnotit z mnoha hledisek. Nejčastějšími kritérii jsou rozměry vláken, uspořádání a objemové zastoupení výztuže. Na obr. 2.3 lze sledovat závislost objemu vláken v kompozitu na jejich vlastnostech (pevnosti, modulu a ceny) za použití různého uspořádání a délky vláken. Prakticky se nevyužívají kompozity nad 70 % objemového obsahu vláken, výjimkou z tohoto jsou balistické aplikace, kde nejsou primární mechanické vlastnosti kompozitu. [17]



Obr. 2.3 Vliv typu výztuže a objemu v kompozitu na jeho vlastnosti [15].

Pro vyjádření množství výztuže a pojiva v laminátu nejčastěji využíváme hmotnostní nebo objemový podíl. Hmotnostní podíl je snadnější získávat při přípravě či výrobě kompozitů a vyjadřuje poměr hmotnosti komponenty (výztuže nebo matrice) k celkové hmotnosti kompozitu. Obdobně objemový podíl je výhodnější při teoretických úvahách a vyjadřuje poměr objemu komponenty k celkovému objemu kompozitu – tyto poměry nazýváme **směšovacími pravidly** [18] [19].

Hmotnostní podíl:

$$M_f = \frac{m_f}{m_c} \quad (2.1)$$

$$M_m = \frac{m_m}{m_c} \quad (2.2)$$

$$M_c = M_f + M_m \quad (2.3)$$

Objemový podíl:

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} \quad (2.4)$$

$$V_m = \frac{v_m}{v_c} \quad (2.5)$$

$$V_c = V_f + V_m \quad (2.6)$$

Pro hustotu kompozitu platí:

Pro převod:

$$M_f = \frac{\rho_f}{\rho_c} V_f \quad (2.7)$$

$$M_m = \frac{\rho_m}{\rho_c} V_m \quad (2.8)$$

$$V_f = \frac{\rho_c}{\rho_f} M_f \quad (2.9)$$

$$V_m = \frac{\rho_c}{\rho_m} M_m \quad (2.10)$$

Reálně ovšem nelze vyrobit dokonalý laminát bez přítomnosti dutin a pórů, s těmi je třeba počítat a stanovit jejich procentuální výskyt. V případě větším než 5 % již nastává zhoršení únavových a dalších mechanických vlastností. Podíl dutin a laminátu je řešen např. v americké normě ASTM D2734-70, která jej stanovuje takto:

$$V_d = \frac{\rho_c \text{teor} - \rho_c \text{exp}}{\rho_c \text{teor}} \quad (2.11)$$

V případě zahrnutí porozity má obecnou platnost vztah:

$$V_c = V_f + V_m + V_p \quad (2.12)$$

Kde V_p je objem dutin.

2.1 Mechanika kompozitů

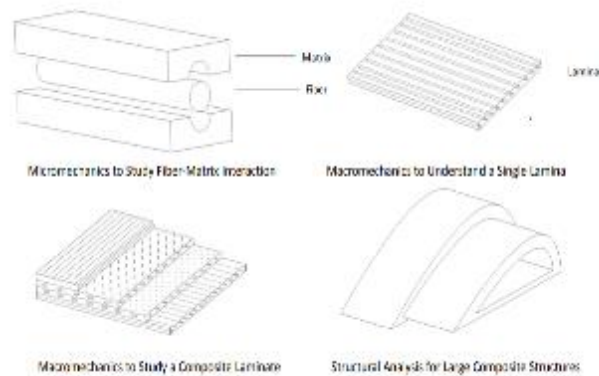
Nejčastěji používanými konstrukčními materiály ve strojírenství jsou kovy. Kovy vykazují ve svých vlastnostech většinou izotropní chování, tzn., že ve všech směrech dosahují stejných hodnot daných veličin. V případě kompozitních materiálů, zejména v případě laminátů, se vyskytují anizotropní vlastnosti, v ideálním případě ortotropní – mechanické vlastnosti jsou jedinečné a nezávislé ve třech na sebe kolmých směrech, tj. ve směru vláken, kolmém a směr kolmý na rovinu výztuže. Souřadnicové osy L, T, T' představují hlavní materiálové osy (L – longitudinální (podélná), T – transfersální (příčná) a T' – transfersální (druhá příčná). Vzhledem k úhlu zatěžování a orientaci vláken pak můžeme uvažovat materiál za ortotropní v případě zatěžování jednosměrného laminátu v hlavním směru $L = 0^\circ$ nebo 90° . Takovému materiálu, pro který platí, že všechny vrstvy jsou stejně orientované, říkáme Lamina.

V případě orientace kompozitu $L = 0^\circ$ vytvoříme extrémně tuhý a pevný laminát ve směru zatěžování, ale ve směru zatížení 90° bude mít tento materiál velmi nízkou pevnost, veškeré zatížení bude přenášeno pouze maticí. Vlákná primárně přenáší zatížení v podélné ose, zatímco matrice přenáší tahové zatížení mezi vlákny, stabilizuje vlákna a v případě tlaku brání proti vyboulení při vzpěru. Matrice také primárně přenáší interlaminární smyk a zatížení ve směru T. Díky těmto vlastnostem se v praxi pro obecná zatížení využívají lamináty využívající směrů 0° , $+45^\circ$, -45° , 90° . Pokud je obsažen stejný počet vrstev dané orientace, nazýváme laminát jako **balancovaný**. V případě symetrie vůči pomyslnému středu laminátu nazýváme symetricky balancovaný s kvazi-izotropními vlastnostmi (stejně vlastnosti v ploše).

Z důvodu standardizace a jednoznačného popisu laminátů a jejich směrů kladení je zavedeno **kódování** laminátů, které určuje jak směr, počet vrstev, tak symetrii laminátu dle ASTM D6507-19. Ve standardním kódu je každá vrstva označena číslem představujícím úhel ve stupních ve směru vláken k hlavní ose laminátu L. Vrstvy jsou odděleny svislou čarou, jsou-li jejich úhly odlišné, vrstvy jsou zařazeny postupně od vrchní ke spodní, závorka značí začátek a konec laminátu. Mají-li sousední vrstvy shodnou orientaci, označujeme ji indexem k, vyjadřujícím počet vrstev.

Při studiu mechaniky kompozitních materiálů lze pracovat na různých úrovních působících interakce mezi jednotlivými složkami, obr. 2.4. Jedná se o mikromechaniku zkoumající

působení vlákna a matrice, makromechaniku zabývající se laminou (jednosměrnými nebo ortotropními materiály), makromechaniku studující obecné materiály a tkaniny a dále strukturální analýzy daného dílu. Obecně lze říci, že makromechanika předpokládá materiál jako homogenní s uvažovanými průměrnými hodnotami, tyto jsou uvažovány k zohlednění různých složek kompozitu.



Obr. 2.4 Stupně interakcí kompozitů [20].

Při základním určování vztahu pro laminu lze vycházet ze základního směšovacího pravidla pro napětí. Pro podélnou pevnost v tahu je výchozím vztahem podmínka silové ekvivalence v podélném směru,

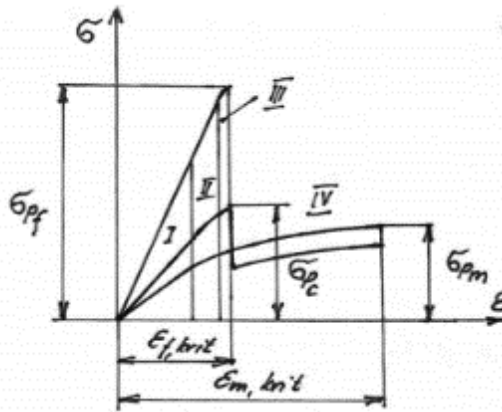
$$F_c = F_f + F_m \quad (2.13)$$

$$\sigma_c \cdot S_c = \sigma_f \cdot S_f + \sigma_m \cdot S_m \quad (2.14)$$

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot v_f + \sigma_m \cdot v_m = \sum_i \sigma_i \cdot v_i \quad (2.15)$$

kde σ_c je průměrné podélné napětí v kompozitu, σ_f je napětí ve vláknu a σ_m je napětí v matrici. S_c je plocha příčného průřezu kompozitu, S_f je plocha průřezů vláken a S_m je plocha průřezu matricí. Směšovací pravidlo pro napětí v kompozitu σ_c bylo odvozeno na základě podmínky statické silové ekvivalence a platí tak bez ohledu na stav materiálu (pružný nebo plastický). Umožňuje stanovit tahový diagram kompozitního materiálu, pokud známe tahové diagramy složek.

Z analýzy vztahu (2.15) vyplývá, že pokud se chovají v průběhu zatěžování obě komponenty lineárně, potom je tahový diagram kompozitu rovněž lineární. Nelineární chování jedné složky pak vede k nelineárnímu průběhu tahového diagramu kompozitu. Typický průběh tahového diagramu kompozitu je uveden na následujícím obr. 2.5



Obr. 2.5 Idealizovaný tahový diagram jednosměrné laminy [18].

Obdobně jako pro napětí lze vyjádřit pravidlo pro modul pružnosti. Ovšem nahrazení směrnic tečen v pracovním diagramu napětí – deformace moduly pružnosti je možné jedině tehdy, deformují-li se obě složky kompozitu elasticky. To může nastat pouze v počáteční části pracovního diagramu kompozitu a je to možné pouze pro kompozity, jako je např. kompozit vyztužený skleněnými či keramickými vlákny v tvrdé polymerní matrici.

$$E_c = E_f \cdot v_f + E_m \cdot v_m \quad (2.16)$$

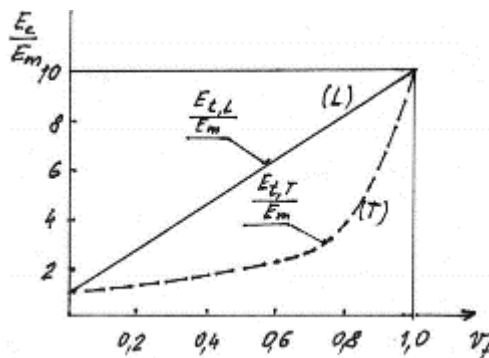
Tahový diagram kompozitu sestává obvykle ze 4 částí:

1. Vlákna i matrice se chovají lineárně pružně, platí zde Hookův zákon pro vlákno matrici i kompozit.
2. Vlákno se chová lineárně pružně, matrice pak pružně plasticky.
3. Vlákno i matrice se chovají pružně plasticky (u vlákn je o velice malý úsek, těsně před prasknutím).
4. Po prasknutí vlákna se matrice chová elasticko-plasticky.

Pro druhou oblast, která většinou zabírá největší oblast pracovního diagramu, platí:

$$E_c = E_f \cdot v_f + E_m \cdot (1 - v_f) \quad (2.17)$$

Z rovnice (2.17) vyplývá, že modul pružnosti E_c je lineární funkcí objemového podílu vláken v_f . Tato skutečnost je graficky vyjádřena na obr. 2.6 přímkou označenou L.

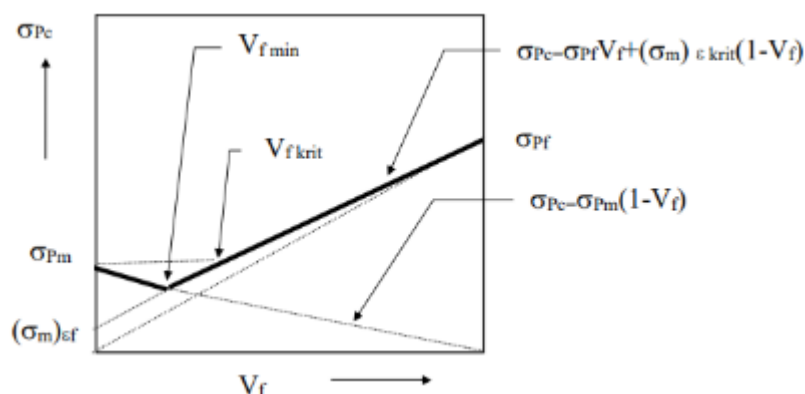


Obr. 2.6 Závislost modulu pružnosti E_c na objemovém podílu vláken v_f [18].

Výsledná tahová pevnost dobře navrženého kompozitního materiálu σ_{Pc} je dána stavem, kdy praskají vlákna, tj. pro kritické přetvoření vláken, $\varepsilon_f = \varepsilon_{fkrit}$, viz obr. 2.7. Má-li podíl vláken hodnotu vyšší než určitou minimální hodnotu, V_{fmin} , matrice není schopna snést celkové zatížení kompozitu po přetržení všech vláken a dochází k porušení kompozitu. Za těchto podmínek je výsledná pevnost kompozitu v tahu určena směšovacím pravidlem:

$$\sigma_{Pc} = \sigma_{Pf} \cdot v_f + (\sigma_m)_{\varepsilon_{fkrit}} \cdot (1 - v_f) \quad (2.18)$$

kde $(\sigma_m)_{\varepsilon_{fkrit}}$ je napětí v matrici odpovídající kritické deformaci vláken.



Obr. 2.7 Výsledná pevnost jednosměrného kompozitu [19].

Ke zpevnování kompozitu vlákny dochází jedině tehdy, když výsledná pevnost kompozitu převyšuje pevnost matrice samotné, tj. když platí:

$$\sigma_{Pc} = \sigma_{Pf} \cdot v_f + (\sigma_m)_{\varepsilon_{fkrit}} \cdot (1 - v_f) \geq \sigma_{Pm} \quad (2.19)$$

kde σ_{Pm} je mez pevnosti matrice. Rovnost v tomto vztahu definuje kritický objem vláken V_{fkrit} , který je třeba překročit, má-li dojít ke zpevnění:

$$v_{fkrit} = \frac{\sigma_{Pm} - (\sigma_m)_{\varepsilon_{fkrit}}}{\sigma_{Pf} - (\sigma_m)_{\varepsilon_{fkrit}}} \quad (2.20)$$

Při objemovém podílu vláken menším než V_{fmin} je působení vláken neúčinné, vlákna se rychle deformují, dosahují kritických hodnot ε_{fkrit} a v kompozitu nedochází k lomu při napětí. Porušení vláken neznamená lom kompozitu. K porušení dochází při napětí $(V_m \sigma_{Pm})$. Výsledná pevnost kompozitu s objemovým podílem vláken nižším než V_{fmin} je určena vztahem:

$$\sigma_{Pc} = \sigma_{Pm}(1 - v_f) \quad (2.21)$$

Z těchto důvodů je vztah (2.21) použitelný pouze tehdy, překročí-li objemový podíl vláken hodnotu V_{fmin} definovanou těmito vztahy:

$$\sigma_{Pc} = \sigma_{Pf} \cdot v_f + (\sigma_m)_{\varepsilon_{fkrit}} \cdot (1 - v_f) \geq \sigma_{Pm}(1 - v_f) \quad (2.22)$$

$$v_{fmin} = \frac{\sigma_{Pm} - (\sigma_m)_{\varepsilon_{fkrit}}}{\sigma_{Pf} - \sigma_{Pm} - (\sigma_m)_{\varepsilon_{fkrit}}} \quad (2.23)$$

Výsledná pevnost kompozitu je funkcí objemového podílu. U kompozitů s polymerní maticí jsou většinou hodnoty $V_{f\text{ krit}}$ a $V_{f\text{ min}}$ velmi nízké (do 1 %), protože většina polymerů vykazuje velmi omezenou plasticitu a deformační zpevnění.

Pro mez pevnosti v tlaku pro podélné zatížení lze odvodit vztah:

$$\sigma_{Pdl} = \frac{E_{Lc} \cdot \varepsilon_{Tk}}{\mu_{LT}} \quad (2.24)$$

Tento vztah ovšem nevyjadřuje smykovou poruchu.

Při porovnávání teoretických podélných vlastností vypočtených z předcházejících rovnic (při použití zjednodušených předpokladů s experimentálně získanými hodnotami) zjistíme odlišnosti. Tyto rozdíly jsou způsobeny převážně následujícími vlivy:

- dezorientace vláken v kompozitu – vlákna nejsou rovnoběžná se zatížením,
- vlákna různých délek – vliv napětí na konci vlákna,
- vlákna různé pevnosti – tažená vlákna nebo SiO₂ vlákna mají značný rozptyl, rozdílné průměry po délce, rozdílné povrchové zpracování,
- kvalita mezifázového rozhraní – přenos zatížení z matrice na vlákno,
- zbytková pnutí – rozdílná teplotní roztažnost složek, rozdíl mezi výrobní a provozní teplotou, rozdílná teplotní roztažnost jednotlivých složek.

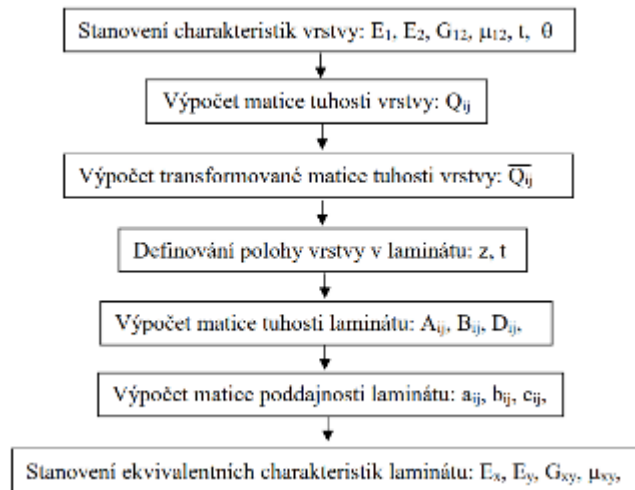
Příčná pevnost a tuhost

Pro hodnocení příčných vlastností vycházíme z modelu příčného řezu kompozitem, který je tvořen střídavými vrstvami vlákna a matrice. Tloušťky vrstev vlákna a matrice jsou úměrné objemovým podílům. Vztahy a odvození pro E_c , η a σ_{Pcd} lze nalézt v [19].

Makromechanika, klasická teorie laminátů

Makromechanika je oblast nauky popisující chování kompozitu od úrovně vrstvy výše. Základní jednotkou je vrstva, která je popsána maticí tuhosti a pevnostními charakteristikami. Mimo oblast mikro a makromechaniky se můžeme setkat i s mezomechanikou, kde je základní jednotkou pramenec (roving) v izotropní matici. V minulosti se pro stanovení výsledných charakteristik laminátu užívaly pomocné nomogramy či síťové analýzy, ale v současnosti při možné výpočetní technice není třeba je představovat. Dnes se jednoznačně pro popis chování laminátu užívá klasická teorie laminátů, která je nastíněna. Celý její popis najdeme níže v literatuře [15] [17] [18] [21] [22] [23].

Při tuhostním návrhu laminátu je možno postupovat podle schématu uvedeném na obr. 2.9. Čtyři základní materiálové charakteristiky (E_1 , E_2 , G_{12} , μ_{12}) jednotlivých vrstev jsou stanoveny výpočtem, doporučeny výrobcem na základě zkoušek nebo odhadnuty ze zkušeností. V každém případě je nutno ověřit zkouškami vlastních dílčích vzorků.



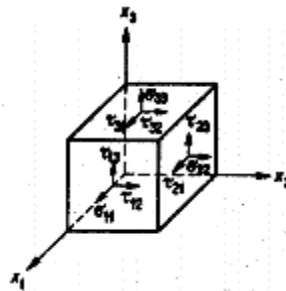
Obr. 2.9 Posloupnost kroků při stanovení tuhostních charakteristik [19].

Kompozitní materiály z hlediska makromechaniky považujeme za homogenní, což neovlivňuje předpoklad o jejich anizotropii nebo izotropii. Vlastnosti vrstev dovolují zařadit kompozitní materiály mezi ortotropní. Nejobecnější lineární vztah mezi tenzorem napětí a deformace vyjadřuje Hookův zákon:

$$\sigma_{ij} = E_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (2.25)$$

který obecněji rozepisuje rovnice 2.31:

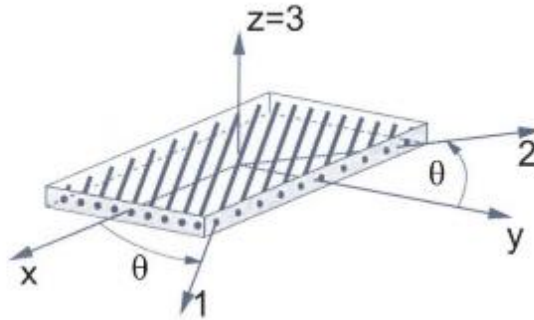
$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = E_{ijkl} \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$



Obr. 2.10 Složky tenzoru napětí [19].

Obecně tedy devíti složkám napětí (dle obr. 2.10), odpovídá devět složek deformace. Proto tenzor tuhosti 4tého řádu E_{ijkl} tvoří obecně 81 modulů pružnosti. Takovýto materiál nazýváme anizotropní. Využitím symetrie a termodynamickými úvahami dokážeme počet složek snížit na 21. Složky tenzorů jsou funkcemi orientace os souřadnicové soustavy. Jednosměrné kompozity jeví symetrii svých elastických vlastností vzhledem ke dvěma kolmým rovinám. Počet nezávislých složek modulů pružnosti ortotropního materiálu je devět. V dalších krocích je stanovena matice tuhosti Q a poddajnosti S .

V případě využití jiné než pravoúhlé orientace je třeba pracovat s obecným souřadným systémem a v něm definovat materiálové charakteristiky, napěťový a deformační stav.



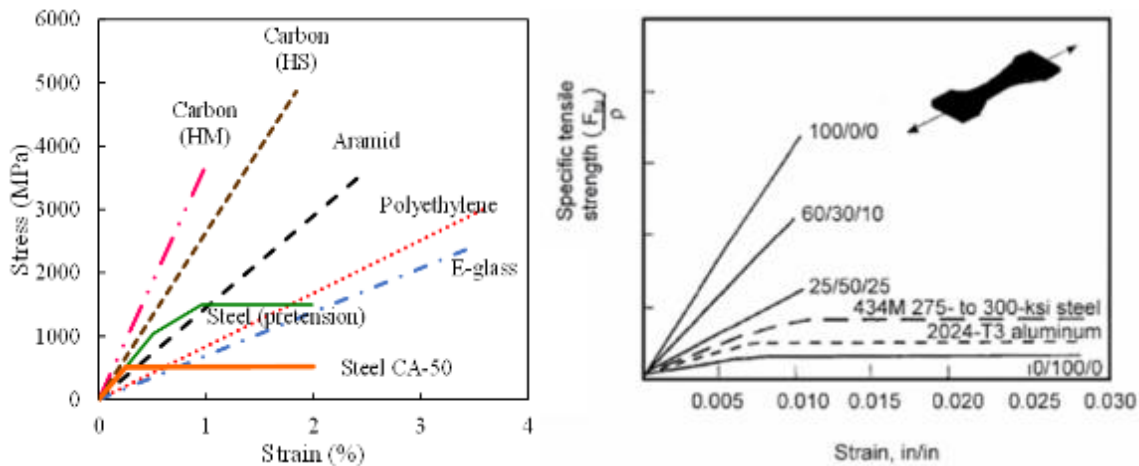
Obr. 2.11 Vztah mezi obecnou a materiálovou souřadnicovou soustavou [19].

Je třeba transformovat tenzory (L) matice tuhosti ze souřadnicové soustavy x-z do souřadnicové soustavy 1–3 , viz obr. 2.11. Jakmile je převedena i matice napětí a deformace, lze stanovit matici tuhosti a poddajnosti. Celá problematika je náročná na přípravu i stanovení podmínek.

Z praktického hlediska a zjednodušení lze stanovit několik významných vlastností laminátu, někdy uváděných jako paradoxy, tyto nám shrnují a popisují matematické vyjádření výše.

Tahová zkouška ve směru vláken

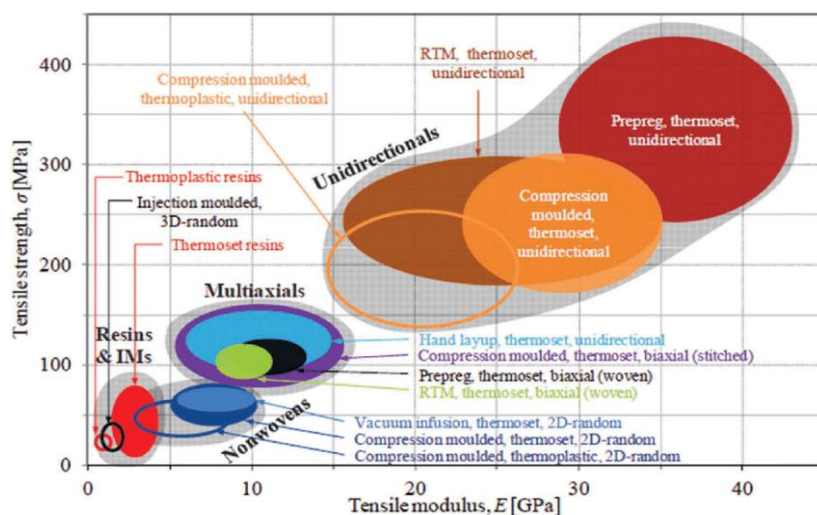
Jednosměrně vyztužený uhlíkový kompozit vykazuje elastickou deformaci až do bodu selhání. Plastická oblast zcela chybí. Při selhání dojde k náhlé delaminaci – oddělení jednotlivých vrstev a křehkému lomu vláken.



Obr. 2.12 Srovnání napěťově deformačních charakteristik [24].

Poměrná tuhost v závislosti na deformaci [25].

Při tahové zkoušce platí Hookův zákon, avšak získaná hodnota Youngova modulu pružnosti platí pouze pro tento směr zatěžování. Je však nutné připomenout, že mez pevnosti i Youngův modul pružnosti uhlíkového kompozitu závisí na mnoha faktorech (konkrétní typ vláken, pryskyřice, procento prosycení). Vyobrazené grafy slouží pouze pro uvedení čtenáře do obrazu. Obecně však lze říci, že uhlíkové kompozity nedosahují takového Youngova modulu jako oceli (obr. 2.12), mají však o něco vyšší modul než slitiny hliníku. Z těchto parametrů se CFRP může zdát jako nijak zvlášť výhodný konstrukční materiál, ale z pohledu poměrných pevností (obr. 2.13) a tuhostí dosahují mnohonásobně vyšších hodnot než kovové konstrukční materiály.



Obr. 2.13 Závislost modulu na pevnosti v závislosti na výrobní technologii [26].

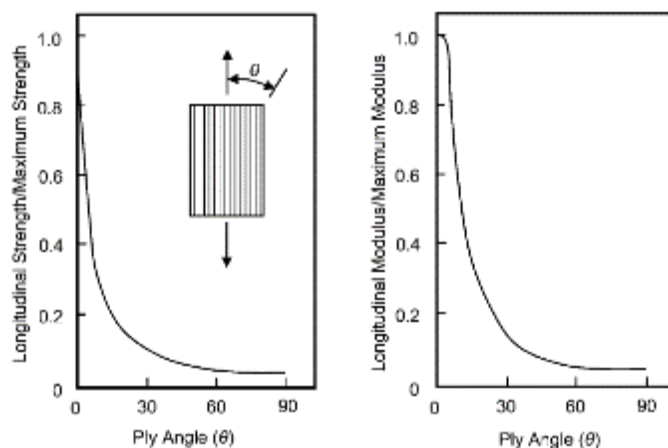
Velmi nevýhodný stav pro jednosměrně vyztužené kompozity je zatěžování kolmo na vlákna. Při tomto zatěžování totiž veškerá pevnost materiálu závisí na pevnosti matrice a vlákna se chovají jako strukturální vruby. Proto má kompozit kolmo na vlákna nižší pevnost, než by měla samotná matrice.

V reálných podmínkách však tyto dva extrémy zřídka kdy nastávají. Většinou je potřeba, aby součásti byly schopné přenášet napětí ve více směrech. Proto se jednosměrné lamináty vrství pod různými úhly nebo se používají tkaniny.

Závislost Youngova modulu na úhlu vlákna

Jak závisí modul pružnosti na úhlu vláken jednosměrně vyztuženého kompozitu, to popisují následující grafy (obr. 2.14). Na nich lze vidět, že kompozit má cca 13x vyšší tuhost ve směru vláken než kolmo na vlákna. Při odchýlení o 10° od směru vláken klesne tuhost cca o třetinu. Pod úhlem 45° už je tuhost jen o 50 % vyšší než kolmo na vlákna. Co se týče pevnosti, tak ta s odchylkou úhlu roste ještě rychleji [17] [18].

Z toho plyne, že u výkonnostních aplikací je přesnost orientace vláken naprosto kritická. Takové podmínky mnohdy nelze spolehlivě dodržet při ručních metodách výroby kompozitních materiálů. V takovýchto případech jsou vhodné automatizované technologie, např. navíjení. [20]



Obr. 2.14 Závislost tuhosti a mezi pevnosti na úhlu zatížení [17].

2.2 Paradox vláknité struktury

Vlákno je mnohonásobně pevnější než kompaktní hmota. Je to způsobeno tím, že vlákno o malém průřezu obsahuje méně materiálových vad než kompaktní hmota. Dalším faktorem je, že vlákna s menším průřezem mají při stejném celkovém objemu vláken větší povrch a tím větší plochu pro kontakt s matricí. Je tedy výhodné mít vlákna o co nejmenším průměru [15] [25].

Paradox délky zatížení

Principiálně je podobný jako předchozí paradox. Uvádí, že kratší vlákna mají vyšší pevnost než vlákna dlouhá. V dlouhých vláknech je vyšší pravděpodobnost výskytu materiálových vad. Rozhodující však není celková délka vlákna, ale zatěžovaná délka. V případě, že jsou vlákna rovnoměrně smáčena matricí, je zatěžovaná délka velmi malá – modelově to lze zjednodušit na vlákno upnuté na mnoha místech své délky, v ideálním případě na nekonečně mnoho místech.

Paradox kompozitního materiálu

Konstatuje, že kompozitní materiál snese větší tahové zatížení, než by snesly jeho složky odděleně. Jeho platnost je důsledkem předešlých dvou paradoxů a toho, že matrice napětí rovnoměrně distribuuje mezi vlákny.

Podmínky vyztužujícího účinku

Nelze zkombinovat vlákna a matrice o libovolných mechanických vlastnostech. Pro správnou funkci kompozitu musí být dodrženy tyto podmínky.

Vlákna vyztuže mají vyšší mez pevnosti než matrice.

$$\sigma_f > \sigma_{mp} \quad (2.27)$$

Vlákna vyztuže mají vyšší Youngův modul pružnosti v tahu než matrice.

$$E_f > E_m \quad (2.28)$$

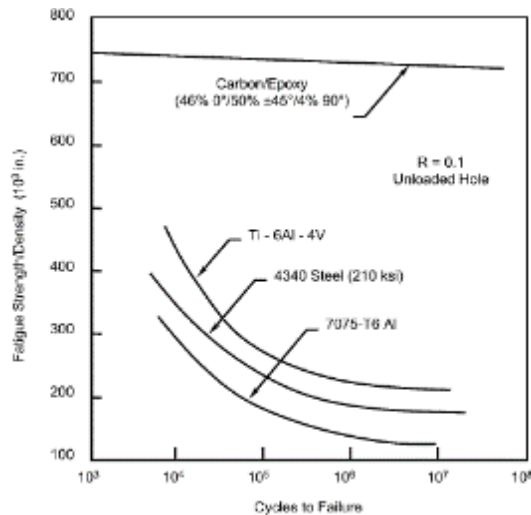
Matrice má větší mezní prodloužení než vlákno.

$$\varepsilon_m > \varepsilon_f \quad (2.29)$$

2.3 Únavové chování laminátu

Kompozitní materiály vykazují nadprůměrné vlastnosti i při únavovém namáhání. Hliníkové slitiny jsou náchylné k šíření únavových trhlin, proto je jejich mez únavy jen 20 % hodnoty meze pevnosti. Uhlíkový kompozit má při cyklickém tahovém namáhání mez únavy 95 % meze pevnosti (obr. 2.15). Tato vysoká odolnost je dána tím, že při porušení vlákna vznikne trhlina v pryskyřici, která se nešíří dále na ostatní vlákna. Výše popsaná charakteristika však platí pouze pro mívivé nebo tepavé cykly. U střídavých zatěžovacích cyklů (střídání tahu a tlaku) je mez únavy cca jen 50 % meze pevnosti [25].

Obecně je výhodné kompozitní součástky konstruovat tak, aby byla vlákna zatěžována na tah, protože při tlakovém namáhání mají vlákna tendenci selhat v režimu ztráty vzpěrné stability a tím pádem pevnost kompozitu závisí více na pevnosti matrice než při tahovém zatížení.



Obr. 2.15 Porovnání meze únavy karbonu a kovových materiálů [17].

2.4 Reakce kompozitu na okolní prostředí

Kompozity jsou díky své struktuře ovlivňovány vlivy okolního prostředí odlišným způsobem než kovové a polymerní materiály.

Teplota

Jednotlivé složky kompozitního materiálu mají rozdílné koeficienty teplotní roztažnosti (uhlíková vlákna mají koeficient délkové roztažnosti téměř nulový), tím pádem vzniká zbytkové napětí a laminát se deformuje [18].

Na zkroucení jsou citlivé především lamináty, které nejsou jednosměrné, protože různě směřované vrstvy působí proti sobě. Proto je potřeba navrhovat lamináty tak, aby jejich list skladby byl symetrický a balancovaný (měl stejný počet $\pm 45^\circ$ vrstev) [18]. Je také důležité sledovat T_g – teplotu skelného přechodu matrice, po jejím překročení matrice ztrácí své vlastnosti i kompaktnost.

UV záření

Pryskyřice používané jako matrice u kompozitů jsou náchylné na poškození UV zářením. Jejich odolnost lze zvýšit např. UV odolnými laky.

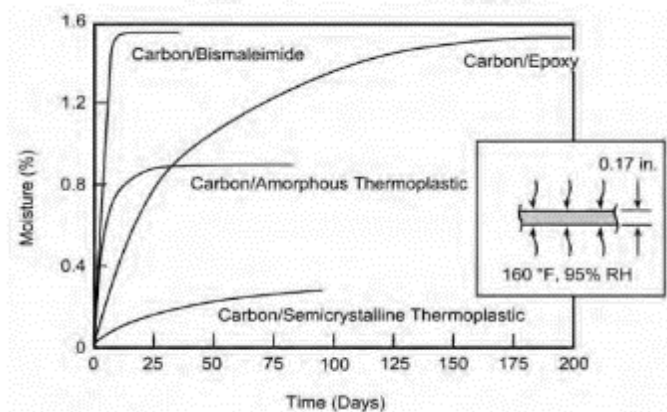
Galvanická koroze – elektrochemická koroze

Kompozitní materiály nepodléhají korozi, ale při kontaktu s hliníkovými slitinami, hořčíkovými slitinami nebo ocelmi může dojít ke galvanické korozi, obzvláště ve slaném prostředí. Součásti se chovají jako galvanický článek [22]. Galvanická koroze je závislá na rozdílu potenciálů látek ve styku, je tedy nutné buď ošetřit povrchy, anebo materiál nahradit třeba za skelné vlákno, které má významně vhodnější vlastnosti.

Galvanické korozi lze zabránit eloxováním hliníkových součástí nebo použitím vložky ze skelných vláken jako izolace [23].

Vlhkost

Uhlíková vlákna jsou hydrofilní, proto je důležité, aby byla vlákna od okolního prostředí ochráněna vrstvou epoxidu. Ostatní druhy vláken a matric jsou také náchylné na degradaci vlhkostí, nejvíce jsou mechanické vlastnosti ovlivněny u aramidových vláken. Nasákavost v čase některých typů kompozitů lze sledovat na obr. 2.16.



Obr. 2.16 Absorpce vlhkosti v čase pro různé materiály [17].

2.5 Materiály výztuže

Vlákna mají v porovnání s kompaktem z téhož materiálu ve směru délky mnohem větší pevnost, protože jsou nečistoty minimalizovány v důsledku malých průřezů. Moderní technologie jsou schopny zabezpečit různé druhy vláken. Mezi vlákna používaná jako výztuž kompozitů patří uhlíková, skelná, aramidová, boron, čedič, UHMPWE (dyneema), innegra, přírodní vlákna a další. Ve speciálních případech se setkáme i s kovovými a keramickými vlákny, jde většinou o případy krátkovlákných kompozitu, nebo v případě speciální lokální výztuže. Vlastnosti vybraných vláken:

- Uhlíková vlákna
 - vysoká tuhost a pevnost
 - poměrně dobře se s nimi pracuje
 - vlákna jsou anizotropní, hydrofilní
- Skelná vlákna
 - vysoká pevnost, nižší tuhost
 - pracuje se s nimi hůře než s uhlíkovými
 - vlákna jsou izotropní
- Aramidová vlákna
 - dobré tlumící vlastnosti
 - nejnižší hustota z vyztužujících vláken
 - anizotropní, silně hydrofilní
 - nízká pevnost v tlaku
- Dyneema® vlákna
 - polyethylenová vlákna
 - vysoká pevnost, houževnatost a odolnost proti impaktu abrazi
 - používají se pro tkaniny v kombinaci s karbonem
 - další použití je výroba vysokopevnostních lan
- Innegra™ vlákna
 - polypropylenové vlákno
 - podobné mechanické vlastnosti jako Dyneema®: odolnost proti nárazu, pevnost a houževnatost
 - využívají se pro zvýšení odolnosti karbonu
- Bazaltová vlákna (čedičová vlákna)
 - nehořlavá a chemicky odolná
 - používají se ve stavebnictví

- ve strojírenství je lze najít v brzdových destičkách, používají se jako tepelná izolace
- Borová vlákna
 - extrémní cena
 - tepelná odolnost
 - odolá námaze tlakem
- Přírodní vlákna na základě celulózy
 - lněná vlákna
 - konopná vlákna
 - jutová vlákna

Kromě toho, že vyztužující vlákna mohou být z různých materiálů popsaných v této kapitole, mohou být i různě uspořádána. Téměř nikdy se při výrobě kompozitů nepoužívají jednotlivá vlákna. Typické vlastnosti materiálů lze nalézt v tabulce 2.1.

Tab. 2.1 Přehled vlastností nepoužívanějších materiálů.

Materiál	Průměr [μm]	Hustota ρ [g/cm^3]	Modul pružnosti v tahu E [GPa]	Pevnost v tahu σ [GPa]	Měrný modul E/ ρ	Měrná pevnost	Bod tání [$^{\circ}\text{C}$]	Prodloužení při přetržení [%]	Cena
E-Sklo	7	2,54	70	3,45	27,0	1,35	1540	4,8	nízká
S-Sklo	15	2,50	86	4,50	34,5	1,80	1540	5,7	střední
Uhlík-HS	7,5	1,90	400	524,50		4,00	500	1,5	vysoká
Uhlík-HM	7,5	1,70	240	6,00	140,0	3,90	3500	0,8	vysoká
Boron	130	2,60	400	3,50	155,0	1,30	2300	3,7	vysoká
Kevlar 29	12	1,45	80	2,80	55,5	2,50	500	3,5	střední
Kevlar 49	12	1,45	130	2,80	89,5	2,50	500	2,5	střední
Dyneema	18	0,98	130	3,30	125,0	3,70	152	3,5	střední
Len	12–16	1,35	30	1,50	50,0	0,80	150	2,5	nízká
Ocel		7,80	208	0,34–2,1	27,0	0,04– 0,27	1480	5–25	nízká
Al slitina		2,70	69	0,14–0,62	26,0	0,05– 0,23	600	8–16	nízká

Nejčastější typy struktur výtuzí jsou:

- **Roviny (pramence)** (angl. angl tow) – jsou sdružené prameny s nulovým nebo malým počtem zákrutů (méně než 40 zákrutů/m) pro výrobu profilů tažením, pro navíjení a pro výrobu prepregů. V metrické soustavě je udávána v jednotce tex. Tex je také délková (lineární) hustota, jednotkou je g/km. Udává kolik gramů má 1000 m vláknenného

produktu. Často je použita i větší jednotka dtex, která udává počet gramů na 10000 m vlákného produktu.

- **Netkané rohože** (angl. mat) – jsou to netkané textilie, rouna. Tvoří je v rovině ležící nahodile uspořádaná kontinuální vlákna nebo sekané prameny větší délky (cca 25–50 mm). Sekaná vlákna jsou v rohoži spojena polymerními pojivky, rozpustnými v rozpouštědlových pryskyřicích. Použijí-li se k výrobě rohoží kontinuální vlákna, není zapotřebí udržet jejich vzájemnou polohu pojivem (vlákna jsou vzájemně propletena). Podobně jako tkaniny jsou i rohože charakterizovány gramáží.
- **Sekané prameny** (angl. chopped fibers) jsou určeny pro přípravu lisovacích a vstřikovacích směsí, prameny jsou nasekány na potřebné délky.
- **Mletá vlákna** (angl. milled fibers). Mletím lze získat krátká vlákna jen v případě křehkých vláken.
- **Rovingové tkaniny** (angl. fabrics) jsou tkané z rovingů. Jsou určeny pro kontaktní laminování, pultruzi, navíjení a výrobu tkaninových prepregů. Nejvýznamnější charakteristikou tkaniny je tzv. gramáž, která udává hmotnost g/m^2 (udává též jemnost tkanin) a typ textilní vazby (plátno, kepr atlas).
- **Hybridní tkaniny** kombinují vlákna různých druhů, například uhlíková + aramidová vlákna, uhlíková vlákna + skleněná vlákna.
- **Prepregy** (angl. prepregs, vyslovuj „pripregy“) jsou to různě široké role nebo kotouče, obsahující buď paralelně uspořádané rovingy, tkaninu nebo rohož a polo vytvrzenou reaktoplastickou nebo termoplastickou maticí. Je možné též vyrobit pramenový prepreg, kde svazek vláken je impregnován reaktoplastickou nebo termoplastickou maticí.
- **Jednosměrné pásy** – obsahují vlákna uspořádaná do jednoho směru. Často bývají kladeny na pomocné fólii pro lepší aplikaci nebo jsou prošity pomocí přídavného materiálu. Ve větších gramážích se setkáváme s uspořádanými a prošitými rovingovými materiály.

Jedním z nejpoužívanějších typů výztuží jsou tkaniny. Je to dáno zejména jejich snadnou zpracovatelností a možností balancovat dané lamináty. Tkaniny jsou tkány pomocí osnovy a útku v kolmém směru. Lze se setkat i s tkaninami tkanými pod úhlem 45° a tkaninami s více směry tkaní – 0, 90, 60 atd. Pro speciální účely lze vyrobit i pletené navzájem svázané 3D struktury. Základní vazby tkanin jsou: plátňová vazba (angl. plain), keprová vazba (angl. twill), atlasová vazba (angl. satin), trojrozměrné tkaniny a jejich kombinace.

Tab. 2.2 Vlastnosti vybraných výztuží.

Název materiálu	Popis	R _m	R _m /ρ	E	R _m /ρ	α	ρ
		[MPa]	[MPa·m ³ ·kg ⁻¹]	[GPa]	[GPa·m ³ ·kg ⁻¹]	[μm·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	[g·cm ⁻³]
E-Glass	UD	1100	647	43	25	11,0	1,7
	tkanina	600	353	20	12	14,0	1,7
Aramid	UD	1100	611	60	33	-0,4	1,8
	tkanina	500	278	30	17	-5,2	1,8
HS karbon	UD	2000	1176	130	76	0,5	1,7
	tkanina	800	471	70	41	3,0	1,7
IM karbon	UD	2400	1412	170	100	0,5	1,7
	tkanina	900	529	90	53	3,0	1,7

Různá vazba poskytuje odlišné vlastnosti výsledného kompozitu, tab. 2.2 Pro zpracování a manipulaci ve složitějších tvarech je doporučena keprová vazba.

2.5.1 Skelná vlákna

Mezi nejpoužívanější vyztužující vlákna patří skelná vlákna. Ta se vyrábějí tažením roztavené skloviny, jejich hlavní složkou je silikátový základ SiO₂. Potřebného průměru vláken se dosáhne dloužením proudu skla tekoucího platinorhodiiovými tryskami (průměr trysky je 1 mm) ve dnu zvlákňovací hlavy. Konečný průměr vlákna je dán rozdílem mezi rychlostí vytékání skloviny a rychlostí odtahování vlákna. Jednotlivá vlákna se po povrchové úpravě sdružují do pramene a navíjejí se na cívku. Sdružením pramenů vzniká roving (pramenec) [27].

Dle složení taveniny a nastavení procesu rozlišujeme několik tipů skel označených jako A-L, tyto se od sebe liší mechanickými vlastnostmi, teplotou tavení a dalšími, jako třeba využití pro dielektrika. Dva nejrozšířenější typy skelných vláken pro strukturální využití jsou:

- E-Glass (Electrical glass)
 - nejčastěji používané
 - dobré mechanické vlastnosti
 - dobré elektrické vlastnosti
 - nižší koeficient roztažnosti než většina konstrukčních materiálů
- S-Glass (High strength glass)
 - dražší než E-Glass
 - vyšší modul pružnosti, více odolné proti teplotním vlivům
 - lepší vlastnosti než E-Glass, protože má více SiO₂
 - nižší tuhost než uhlíková vlákna, ale srovnatelná pevnost

O mikrostrukturu skleněných vláken je velmi málo poznatků vzhledem k jejich amorfnímu stavu, který je způsoben nepatrnou krystalizační rychlostí směsi oxidů při ochlazování taveniny.

Předpokládá se, že na vysoké pevnosti skleněných vláken, vedle velikostního faktoru (malý povrch a malé defekty v tenkém vláknu), se podílí také odlišná struktura jádra a povrchových vrstev. Zatímco jádro obsahuje nahodile orientovanou síť kovalentně vázaných atomů, povrch má pravděpodobně semi-orientovanou strukturu. Na povrchu tak vzniká vysoké tlakové napětí v podélném směru, které zabraňuje snadnému rozvoji trhlin při tahovém zatížení vlákna. Podobný mechanismus je v souladu se skutečností, že jakékoliv narušení povrchových vrstev (např. mechanické poškrábání) vede k drastickému poklesu tahové pevnosti vlákna. Předpokládaná tenká povrchová vrstva s preferovanou orientací kovalentních vazeb se však neprojevuje měřitelnou anizotropií elastických veličin skleněného vlákna. Při mikromechanických výpočtech se uvažují stejně velké hodnoty modulu pružnosti E a Poissonova poměru ν ve směru podélném i příčném [28] [29].

Při průměrech 3 až 4 μm obdržíme kompozity s větší pevností v tahu než při použití vláken běžných průměrů. Na laminátech vyztužených skleněnými tkaninami z tenkých vláken bylo zjištěno, že se zvýšil i modul pružnosti. S vlákny velkých průměrů (60 a více μm) mají kompozity větší pevnost v tlaku působícím ve směru vláken. Rozdíly dosahují řádově desítky MPa. Z technologických důvodů jsou nejběžnější průměry od 7 do 15 μm (roving z vláken malých průměrů se totiž hůře prosycuje pryskyřicí) [30]. Úprava povrchu proti absorpci vody a dalším vlivům prostředí, při výrobě a prosycení je řešena v [31] [32] [33].

2.5.2 Uhlíková vlákna

Ve většině výkonnostních aplikací kompozitních materiálů narazíme na uhlíková vlákna, mnohdy ve formě tkaniny, jednosměrných nebo biaxiálních materiálů. Jako první našla využití v kosmickém a leteckém průmyslu, následoval motorsport a další odvětví. Dnes jsou uhlíková vlákna běžně používána v automotive, cyklistice, jachtařském průmyslu, výrobě lyžařských hůlek a jiných sportovních potřeb. Celosvětová produkce uhlíkových vláken roste každoročně o 10 %.

Rozměry jednotlivých uhlíkových vláken se běžně pohybují okolo 5 až 10 mikrometrů. Je pro ně charakteristická nízká hustota (cca 60 % hustoty hliníku), vysoká pevnost, malá tažnost a progresivní deformační chování. To znamená, že se s rostoucím zatížením zpevňují – roste jejich Youngův modul pružnosti.

Vysoká pevnost vláken je dána kovalentními vazbami, které drží atomy uhlíku pohromadě. Vlákna však nejsou izotropní. Kovalentní vazby působí v axiálním směru vláken, kolmo na ně působí slabé Van der Waalovy síly. Anizotropie se projevuje i u hodnot délkové teplotní roztažnosti, v axiálním směru je mírně záporná, ve směru kolmém je kladná. Vlákna jsou hydrofilní a silně abrazivní [17] [20].

Existuje několik typů uhlíkových/grafitových vláken. Ty se liší mechanickými vlastnostmi, které jsou dány způsobem výroby a polotovarem. Podobně jako v jiných odvětvích průmyslu, i zde jsou rozšířena různá marketingová označení, která mnohdy vnášejí do terminologie více nejasností než užitku. Ne všechna vlákna, jejichž hlavní složkou je uhlík, se totiž nazývají uhlíková.

Uhlíková vlákna (PAN)

Drtivá většina CFRP využívá PAN uhlíková vlákna. To jsou vlákna, která jsou vyráběna několikastupňovým tepelným zpracováním (oxidací, karbonizací a případnou grafitizací) polyakrylnitrilových vláken – zkráceně PAN.

PAN vlákna se dělí dle mechanických vlastností:

- HS (High Strentg) – mají střední modul pružnosti a dobrou pevnost v tahu. Lze je považovat za standardní uhlíková vlákna, někdy označována jako HT (high tensile).

- IM (Intermediete modulus) – vlákna velmi pevná se středním modulem pružnosti.
- HM (High modulus) – vysokomodulová grafitizovaná vlákna.
- VHM/UHM (Very/Ultra High modulus) – vlákna s velkým modulem pružnosti.

Prvním krokem je dlužení PAN vláken a stabilizace zahřátím na teplotu 200 až 300 °C. Přitom jsou vlákna udržována pod napětím systémem kladek a jsou za přístupu vzduchu dehydrována. Dalším krokem je karbonizace neboli pyrolýza, tedy termický rozklad organické látky za nepřístupu vzduchu. Pyrolýza probíhá při teplotách do 1600 °C a žebříčková struktura molekul se přemění na grafitovou hexagonální strukturu. Karbonizací končí výroba HT a IM vláken, následuje pouze povrchová úprava, při které se na vlákna nanese tenký povlak chránící před vzájemnou abrazí vláken.

HM vlákna, která jsou z uhlíkových PAN vláken nejužší, podstoupí při výrobě jeden stupeň tepelného zpracování navíc – grafitizaci. Ta probíhá při teplotách do 3000 °C.

Grafitová vlákna (Pitchová vlákna)

Pitchová vlákna jsou tužší – běžně dosahují modulu 600 GPa a více. Existují však i vlákna s modulem 960 GPa blízké se tuhosti diamantu, jehož hodnota tuhosti odpovídá 1000 GPa. Od PAN vláken se liší prekurzorem při výrobě, tím je dehet (anglicky "Coal tar pitch"/"Petroleum pitch"). Proces výroby je podobný jako u PAN vláken. Pitchová vlákna se označují jako UHM (ultra high modulus) a jsou oblíbeným marketingovým lákadlem např. v cyklistice. UHM vlákna jsou však velice křehká, a proto z nich není možné vyrábět např. prepregy, které musí být ohebné [34] [35].

Uhlíková vlákna se vyznačují těmito zvláštnostmi:

- anizotropií mechanických vlastností – ve směru kolmém k ose vlákna mají vlákna modul pružnosti výrazně menší, na úrovni hodnot polykrystalického grafitu,
- křehkostí – prodloužení při přetržení je menší než u skleněných vláken, minimální poloměr při ohýbání je proto větší než u skleněných vláken,
- záporným koeficientem délkové teplotní roztažnosti α , tj. při ohřevu se vlákno zkracuje. Ve směru kolmém má α kladnou hodnotu, která je větší než u vláken skleněných.

Úprava povrchu uhlíkových vláken

Vyrobená uhlíková vlákna jsou podobně jako vlákna skleněná dodatečně upravena. Účelem je odstranit z povrchu vláken látky bránící kontaktu s matricí, omezit další adsorpci plynů na povrch vláken, zvýšit reaktivitu povrchu vůči vazebným prostředkům a matricím a chránit vlákna před vzájemnou abrazí (uhlíková vlákna jsou křehčí než skleněná) [36] [37].

2.5.3 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna patří ke skupině polymerních vláken označovaných jako Aromatické polyamidy (APA), jejichž největší výhodou je malá hustota. Nejznámějším označením je Kevlar společnosti DuPont (patentováno 1965). Kevlar (poly-para-fenylen tereftalamid) – para-aramid je dražší než skleněná vlákna, jeho hlavní výhody jsou:

- malá hustota,
- velká odolnost proti abrazi,
- schopnost plasticky se deformovat při působení síly kolmo na osu vlákna, vlákna nejsou křehká, využití pro balistické účely a ochranné oděvy,

- v rámci polymerů odolnost vůči teplotě měknutí (520 °C) a ohni.

Levnější méně tuhá i méně pevná vlákna získaná jako poly-metha-fenylizofalamid (meta-aramid) je obchodně označován jako Nomex (DuPont) a bývá využit jako ochranná vrstva nebo pro výrobu voštin.

Výroba probíhá pomocí zvláknování PPTA rozpuštěné v kyselině sírové. Při průtoku roztoku kapilárou dochází u molekul k paralelnímu uspořádání tyčinkových makromolekul rovnoběžně s osou vlákna. Roztok je vytlačován do ledové vodní tříště, kde je vyplavena kyselina sírová. Následuje dlužení za tepla, které přispívá ke zvýšení pevnosti a tuhosti vlákna.

Jedna z nevýhod aramidových vláken a tkanin je poměrně rychlá degradace a zhoršení mechanických vlastností ve vlhkém prostředí při absorpci vlhkosti.

Další názvy a podobné produkty k para-aramidům nalezneme pod označením Twaron, Technora [17] [38] [39].

2.5.4 UHMWPE (Ultravysokomolekulární polyethylen)

Tato vlákna vyrobená z polyethylenu s velmi dlouhými molekulami pomocí zvláknování gelu vykazují unikátní vlastnosti. Výrobu započala r. 1985 společnost DSM pod značkou Dyneema, dnes jsou rozšířené i jinými firmami pod názvy Spectra (Honeywell), Tekmilon, Tivar, Tensylon, atd. Pro balistickou ochranu jsou určeny vlákna typu Dyneema SB a HB, SpectraShiled.

Ohebné makromolekuly lineárního polyethylenu mají kovalentní vazby mezi uhlíky uloženy v rovině. Pro dosažení vysoké pevnosti i tuhosti vlákna je nutno rozpustit UHMWPE v některé příbuzné látce (parafinový olej, dekalín, zahřátý parafinový vosk). Vzniká porézní vlákno, které se dále za tepla dluží. Vlákno se dodává jen ve formě multifilamentu (ani monofilamenty, ani stříž z dyneemy nejsou známy) v jemnostech cca od 5,5 do 264 tex, ve svazcích s 20 až 750 kapilárami s jemností 2,2 dtex (rozměry průřezu kolísají mezi 9 a 30 μm).

Kromě malé hustoty ($\rho = 970 \text{ kg/m}^3$, PE plave na vodě) je velkou výhodou UHMWPE též velká korozní odolnost. Nepolárnost polymeru a čistě uhlovodíkový skelet makromolekuly zaručují při normální teplotě odolnost vůči většině chemikálií, s výjimkou silně oxidačně působících roztoků (např. koncentrované kyseliny dusičné a hydroxidu sodného), které vlákno slabě narušují. Na rozdíl od aramidů UHMWPE vlákno nepřijímá vlhkost a je více odolné proti světelnému UV záření. Houževnatost a odolnost UHMWPE proti otěru je podobná jako u aramidových vláken.

Hlavní nevýhodou UHMWPE vláken je jejich malá tepelná odolnost. Teplota tání krystalů PE se orientací makromolekul příliš nezvyšuje (je okolo 135 °C). Chemická netečnost vláken zvyšuje nároky na jejich po vrchovou úpravu pro zajištění dobré soudržnosti s polymerními matricemi. Bez povrchové úpravy je smyková pevnost rozhraní vlákna a např. epoxidové matrice na minimální úrovni (asi 0,8 MPa). Zatímco aramidová vlákna je možno například i leptat, u PE je perspektivní pouze úprava vysokofrekvenčním plazmatem s použitím argonu a přidáváním nízkomolekulárních sloučenin (např. allylaminy) [17] [40] [41] [42].

2.5.5 Čedičová vlákna (Basalt fibers)

Jde o vlákna s vlastnostmi podobnými skleněným vláknům typu S. Výhodou je jejich cena, která činí asi 60 % skleněných S vláken a dobrá chemická odolnost. Výroba je analogická výrobě skleněných vláken, teplota tavení je 1450 °C. Čedičová vlákna mají ve srovnání se skleněnými vlákny typu E odlišné složení a vlastnosti. Výroba je také hodnocena jako ekologičtější, avšak je soustředěna na neobnovitelný zdroj – nerost čedič.

2.5.6 Přírodní rostlinná vlákna

Organická přírodní vlákna jsou získávána z pěstovaných rostlin. Hodnoty hustoty, pevnosti, tuhosti a poměrného prodloužení při přetržení uvádí následující tabulka. Jejich jádro tvoří celulóza a lignin, použití části rostlin se různí dle druhu a využívané části, stejně jako výroba a sprádkání vláken. Jejich přirozená vlastnost je různá délka a průměr jednotlivých vláken, ze kterých jsou následně tvořeny rovingy. Z těchto důvodů mají mechanické vlastnosti velký rozptyl. Zvýšení mechanických vlastností lze dosáhnout vhodnou povrchovou úpravou (máčení chem. sloučenin – hydroxidy pro zvýšení afinity k matici, ošetření plazmou atd.). Mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tab. 2.3.

Tab. 2.3 Tabulka mechanických vlastností vybraných přírodních vláken [43], [44].

Vlákna	Hustota [g/cm ³]	Pevnost v tahu [GPa]	Modul Pružnosti E [GPa]	Mezní prodloužení při přetržení [%]
Celulózová vlákna Greenline	1,50	0,675	35,0	6,2
Juta (Jute)	1,30–1,50	0,183–0,773	30,0–55,0	1,4–3,1
Konopí (Hemp)	1,40–1,50	0,580–0,773	30,0–55,0	1,3–4,7
Sisal	1,33	0,507–0,855	9,0–28,0	2,0–3,0
Len (Flax)	1,53	0,800–1,795	40,0–85,0	1,1–1,5
Kenaf	1,45	0,330–0,930	22,0–53,0	3,7–6,9
Kokosové ořechy	0,70–1,00	0,106–0,270	37,0	30,0–40,0
Ramie	1,50	0,400–0,838	60,0–128,0	1,2–3,8
Bavlna	1,50–1,60	0,287–0,597	5,5–12,8	3,0–10,0
Kopřiva	2,11	1,590	87,0	2,1
Bambus	1,50	0,300–0,340	16,2	23,8

Použití rostlinných vláken v termoplastech přináší tyto výhody:

- jedná se o levnou výztuž s malou hustotou,
- dochází k úspoře polymeru,
- použitím výztuže z přírodních vláken klesne cena výrobku,
- je možno zkrátit výrobní cyklus (kompozit má větší tepelnou vodivost než samotný plast),
- odpad je recyklovatelný,
- výztuž je biodegradabilní,

- povrch výrobku má přírodní vzhled,
- vlákna nezpůsobují opotřebení činných dílů zpracovatelských strojů (šneků, tavné komory a formy).

Největší využití v oblasti kompozitů přírodních vláken je v oblasti automotive, pro vnitřní výplně dveří a dalších panelů. Lze se s nimi setkat i v oblasti architektury a nábytku. Na bázi celulózy je produkován produkt WPC „Wood Plastic Composite“ pro stavebnictví a architekturu – dlažba, prkna, doplňky.

2.5.7 Ostatní vlákna

Lze se setkat s dalšími typy vláken, zde je jejich výčet:

- Polyethylentereftalátová vlákna (PET) – známá jako polyester, nejčastěji oděvní tkaniny a lana. Dacron je znám výrobou plachet. V oblasti kompozitů se využívají jako pomocné materiály.
- Polyetherimidová vlákna (PEI) – zvláknování termoplastu Ultem, nehořlavá, vysoká teplotní odolnost, malá navlhavost.
- Polymidová vlákna (PI) – nehořlavost je výhodou pro ochranné oděvy.
- Vlákna HMPP (vysokomodulová vlákna polypropylenu) – obchodní označení Innegra, dobrá tuhost i pevnost vůči skleněným vláknům, avšak s nižší hustotou a odolností vůči otěru s dobrou houževnatostí blízká se kevlaru. Ideální pro hybridní tkaniny.
- Vlákna PBO – jde o poly(p-phenylene-2,6-benzobisoxazol), zkráceně polybenzobisoxazol. Tato vlákna jsou tvořena tuhými žebříkovitými makromolekulami (“ladder polymer”). Pod obchodním názvem Zylon, vlákna vynikají tuhostí, která převyšuje aramidová vlákna a zhruba dvojnásobným modulem pružnosti.
- Vlákno M5 (PIPD) – silné mezimolekulární síly (prostorové vodíkové vazby) a vysoká tuhost makromolekuly dávají tomuto vláknu výjimečné vlastnosti – vlákna mají velmi vysokou pevnost v tahu, větší modul pružnosti než nízkomodulová uhlíková vlákna z PAN a také měrným modulem (hustota 1700 kg/m³) předčí všechna nízkomodulová uhlíková vlákna a PBO vlákna. Důležitá je také velká adheze k pryskyřicím (pro epoxidovou pryskyřici DER353 je IFSS (“InterFacial Shear Strength”) 59 MPa oproti 28 MPa u Kevlaru KM 2).

2.6 Používané matrice

Jak již bylo zmíněno, nejčastěji se používají pro výrobu kompozitů polymerní matrice. Existují i aplikace keramických a kovových matric. Těm však není v této práci věnována pozornost, vzhledem k jejich nepravděpodobné aplikaci ve strukturálních dlouhovlákných kompozitech. Z hlediska objemu využití je nejvíce zastoupena polyesterová pryskyřice, hlavně díky nízké ceně a využití pro rozměrné dílce, kde hlavní roli hraje cena. Pro pevnostní kompozity, u kterých je třeba brát zřetel na poměr pevnost váha, je hlavně využívána epoxidová pryskyřice. Pro speciální aplikace, kde je požadována zhášivost nebo práce při vyšších teplotách, jsou uvedeny další druhy níže.

Základní rozdělení matric dle typu polymeru [16]:

- **Termosetické (reaktivní)**
 - nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)
 - levné, mají široké využití, nízká pevnost

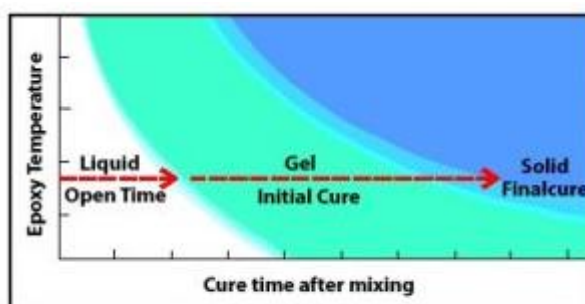
- vinylesterové (VE-R)
 - dražší
 - vyšší odolnost proti teplotám a chemikáliím
 - tuhé, křehké
 - epoxidové pryskyřice (EP-R)
 - nejlepší mechanické vlastnosti, vyšší cena
 - fenolitické pryskyřice
 - křehké
 - málo hořlavé, chemicky odolné
- **Termoplastické**
- nižší pevnost
 - vyšší nároky na zpracování
 - tažné, odolné

Konkrétních typů polymerů je nepřehledné množství, proto se tato práce věnuje především epoxidovým pryskyřicím, které jsou standardem pro CFRP.

2.6.1 Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice (EP-R) jsou nejpoužívanější matricí uhlíkových kompozitů. Jedná se však o velmi široký pojem, existuje mnoho druhů. Jejich hlavní výhody jsou dobré mechanické vlastnosti, rozměrová stálost a dobrá přilnavost. Epoxidy patří k nevhodnějším pryskyřicím pro použití na dynamicky namáhané díly. Jen 10 % epoxidů je využito na kompozitní materiály. Dále se využívají jako vícesložková lepidla, povlaky, při výrobě forem nebo se s nimi zalévají elektrické komponenty.

Většinou jsou epoxidové pryskyřice za pokojové teploty v tekutém stavu a po přidání tvrdidla (tužidla) započne polyadiční reakce (síťování), která způsobí vytvrzení. Je potřeba dodržet přesný stechiometrický poměr tvrdidla a pryskyřice. Vytvrzování může probíhat za tepla i za studena, podle konkrétního typu pryskyřice a tvrdidla. Toho se s výhodou využívá u domácích aplikací, kdy při použití pryskyřice vytvrzované za studena není potřeba pece. Rychlost vytvrzovací reakce lze ovlivnit přidáním inhibitoru nebo katalyzátoru, většinou lze zakoupit k jedné pryskyřici více druhů tužidel lišících se dobou zpracovatelnosti, viz obr. 2.17.



Epoxy Temperature vs. Cure Time.

Obr. 2.17 Fáze vytvrzování pryskyřice [45].

Oproti jiným termosetickým pryskyřicím mají EP-R vyšší viskozitu, tím pádem obtížněji smáčejí tkaninu. Jsou také výrazně dražší, vynahrazují to ale lepšími mechanickými vlastnostmi – nižší vnitřní pnutí po vytvrzení, vyšší pevnost a rozměrová stálost. Viskozitu lze dále upravovat dle použití.

Existují i pryskyřice s přidanými nanočásticemi, nanotrubičkami nebo termoplastickými částicemi (hardened epoxy) pro vyšší pevnost a houževnatost. Obecně pak houževnatější pryskyřice přispívají tomu, že je kompozit méně citlivý na delaminaci. V důsledku polárnosti (přítomnosti hydroxylových skupin) jsou navlhavé, takže za přítomnosti vody je nutné počítat se značným zhoršením teplotní odolnosti i u pryskyřic s velkou teplotou skelného přechodu (tetrafunkční epoxidy) v důsledku plastifikačního účinku vody [16] [17] [27].

Základními druhy epoxidových pryskyřic pro kompozity jsou:

- glycidily bisfenolu A, např. diglycidylether BPA-zkratka DGEBA,
- novolakové pryskyřice, např. glycidylether fenolického novolaku (vyšší teplotní odolnost),
- třífunkční epoxidy, například triglycidylethertrifenylmethan (TGETPM) nebo triglycidylaminofenol (TGAF),
- tetrafunkční epoxidy, např. tetraglycidyl methyldianilin (TGMDA).

S rostoucí funkcí epoxidu roste hustota sítě ve vytvrzeném stavu, což spolu s existencí aromatických skupin v řetězci dává větší teplotu skelného přechodu, a tedy je i vyšší teplotní odolnost (maximální pracovní teplota T_g je u epoxidové pryskyřice TGMDA 240 °C). Jako reaktivní rozpouštědla příliš viskózních epoxidů se uplatňují jednofunkční epoxidy (které zvyšují nejen lepivost směsi ale i křehkost pryskyřice) a dále peroxidové a dvoufunkční epoxidy s alifatickými řetězci, např. butylenglykoldiglycidylether (BGDGE), jejichž přidáním se zvyšuje houževnatost pryskyřice bez snížení teplotní odolnosti.

Tvrdidla pro epoxidové pryskyřice jsou:

- alifatické aminy, např. DTA (diethylentriamin), TETA (triethylentetraamin) pro vytvrzování za normálních teplot,
- polyamidy (poměr tvrdidla a pryskyřice se může měnit v širokém rozmezí, při podílu 1:1 je pryskyřice nejhouževnatější),
- cykloalifatické aminy, např. AEP (aminoethylpiperazin), DEAPA (diethylamino-propylamin),
- aromatické aminy, např. MPDA (methafenyldiamin), MDA (methyldianilin) a jejich eutektické směsi, DDS (diaminodifenylsulfon) je tvrdidlo pro vícefunkční epoxidy),
- anhydridy karboxylových kyselin, např. HHPA (hexahydroftalový anhydrid), TMA (trimelitanhydrid), BTDA (benzofenontetra-karboxylový dianhydrid), CA (anhydrid kyselinyhexachlorokarboxylové), DDSA (anhydrid kyseliny dodecyljantarové),
- lewisovy tvrdidla, především komplex BF₃-MEA (trifluorid bóru s monoethylaminem), který může fungovat též jako urychlovač v kombinaci s jiným tvrdidlem, např. DDS,
- lyanamidy, především DIC Y (dikyandiamid).

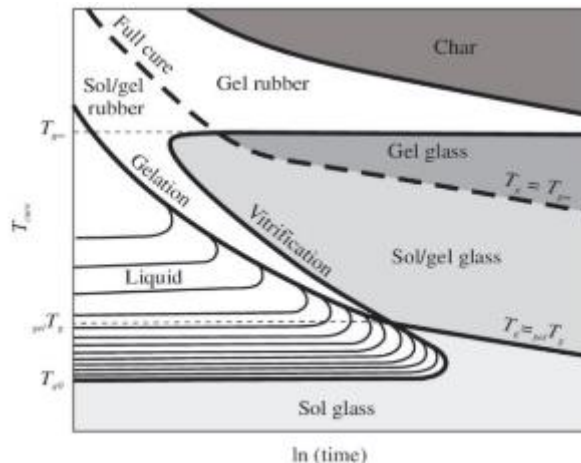
Vytvrzování EP-R

Vytvrzování je exotermická reakce, při které dochází ke změně viskozity a objemu pryskyřice. Při tvorbě nových chemických vazeb se uvolňuje energie ve formě tepla. Při měření teploty reakce (především za studena) lze pozorovat, jak reakce probíhá a kdy byla ukončena. Hlavní

parametry ovlivňující vytvrzovací reakci jsou teplota a čas. Při bouřlivé exotermní reakci, která může vzniknout při hmotnějších dílech nebo při nezpracování pryskyřice v nádobě, mohou teploty překračovat 100 °C a v některých případech i zadýmit – hrozí nebezpečí požáru, dušení. Pokud taková exotermní reakce proběhne ve vyráběném díle, tento je znehodnocen.

Pro správné vytvrzení je kritické porozumění vývoji viskozity. Obzvláště je to důležité při vytvrzování za tepla – např. u vytvrzování prepregů v autoklávu nebo lisování za tepla. Jako první dojde při zahřátí pryskyřice k poklesu její viskozity na základě známých fyzikálních principů. Tato fáze je důležitá, protože pryskyřice může volně téct a prosytit tkaninu. Rovněž dochází k eliminaci vzduchových bublin. Působení tepla má však za důsledek také polyadiční reakci – tedy síťování, což viskozitu zvyšuje. Interval, kdy viskozita dosáhla takové hodnoty, že pryskyřice nemůže téct (už není tekutou hmotou – elastická tuhá hmota s malým modulem pružnosti), se nazývá doba gelace. Může tak nastat situace, kdy při použití pryskyřice s příliš krátkou dobou vytvrzení nestihne matrice prosytit všechna vlákna a gelace už proběhla, což je samozřejmě nežádoucí [27] [46] [47].

Pro určení vlastností pryskyřice během vytvrzování se využívají diagramy TTT (Time-Temperature-Transformation), viz obr. 2.18. Tyto nám udávají vztah mezi časem teplotou a fází zpracování. Na jejich základu lze volit vhodné technologické podmínky, a naopak stanovit kritické hodnoty teplot a časů. Například pro výrobu prepregů se pryskyřice musí dostat z kapalného stavu (stav tzv. rezolu) do předvytvrzeného stavu, nazývaného stavem B (tzv. resitol), v němž již pryskyřice neteče, je ale lepivá a po ohřátí se dotvrdí. Konečný stav vytvrzené pryskyřice, tzv. resit, se vyznačuje nelepivostí, nerozpustností a teplotou skelného přechodu ležící nad teplotou okolí. B stav mají všechny termosety, tj. pryskyřice polyesterové, vinylesterové, fenolické, epoxidové. Pro autoklávkovou technologii lze z diagramu TTT určit pro danou teplotu dobu, po kterou je pryskyřice tekutá a stanovit počátek zavedení přetlaku.



Obr. 2.18 Diagram TTT [48].

Z diagramu je také patrné, že je třeba pracovat i za určité minimální teploty. Pokud této není dosaženo, tak se pryskyřice nikdy nevytvrdí, zůstane ve stavu gelace nebo v případě vytvrzení za delší čas ztrácí své mechanické a jiné vlastnosti. [48]

Výsledné vlastnosti lze ovlivnit u pryskyřic vytvrzovaných při pokojové teplotě následnou teplotou, která zlepšuje jejich mechanické vlastnosti, tak výslednou teplotu T_g . Tyto teploty a čas výdrže (řádově hodiny) stanovuje výrobce nebo je třeba je experimentálně ověřit.

Během tuhnutí také dochází ke smrštění a tím pádem zvýšení hustoty. S tím je potřeba při konstrukci počítat, i s ohledem na použité vrstvy laminátu, aby nedošlo k nežádoucímu pokroucení či deformaci. Obzvláště nebezpečné z hlediska vnitřního pnutí je smrštění, které

nastane po době gelace. Proto je důležité dodržovat pravidla symetrického a balancovaného kladečního plánu.

Nedostatečné vytvrzení má negativní vliv na zrychlené stárnutí pryskyřice, odolnost proti chemickým vlivům a samozřejmě na mechanické vlastnosti. Při vytvrzení za studena téměř vždy dojde k neúplnému zasíťování. Vytvrzení za studena se však mnohdy nelze vyhnout, obzvláště u velkoobjemových dílů (lodě, velkopřůměrová potrubí). Někdy může být neúplné vytvrzení žádoucí – např. u zmiňovaných lodí zajišťuje neúplné vytvrzení nižší křehkost a lepší tlumení.

Jak již bylo zmíněno, tak doba vytvrzení závisí na teplotě a tlaku. Zvýšením teploty lze vytvrzovací reakci urychlit, ale jen do určité meze. U epoxidových pryskyřic je hranice cca 200 °C, nad kterou dochází k degradaci materiálu v důsledku příliš vysoké teploty [47] [49] [50].

2.6.2 Polyesterové pryskyřice (UP-R)

Patří k nejpoužívanějším pryskyřicím. Lineární nenasyčený polyester je připraven reakcí dvoufunkčních složek (polypropylenglykolu a kyseliny ftalové, kumaronové, maleinové nebo anhydridu (ftalanhydridu, maleianhydridu)). Vzniklý předpolymer je poté rozpuštěn v reaktivním rozpouštědle (obvykle styrenu), ale existují i nestyrenové nenasyčené polyesterové pryskyřice, kde reaktivním rozpouštědlem je některý typ methakrylátu.

Volbou vytvrzovacího systému lze dosáhnout širokého rozmezí doby gelace a doby vytvrzení. Polyesterové pryskyřice lze proto použít pro všechny technologie. Viskozitu pryskyřice určuje podíl reaktivního rozpouštědla. Pro technologie vyžadující malou viskozitu pryskyřice (0,2 až 0,4 Pas) je obsah rozpouštědla volen větší (pro navíjení, injektážní a infuzní technologie (SCRIMP, VIP a RTM)), ovšem za cenu menší pevnosti a tepelné odolnosti. Přísady zabráňující odpařování rozpouštědla (vosky) jsou účinné pouze tehdy, je-li pryskyřice v klidu, při jejím nanášení je jejich účinek zanedbatelný. [46]

Nemodifikované nenasyčené polyesterové pryskyřice mají velké smrštění při vytvrzování (7 % až 8 %). Jsou křehké, snadno v nich vznikají mikrotrhlinky. Elektrické vlastnosti mají dobré, stejně jako odolnost proti ultrafialovému záření. Pryskyřice dobře smáčejí skleněná vlákna, ale pevnost vazby matrice-skleněné vlákno je menší (nejsou tak dobrými „lepidly“ jako epoxidové pryskyřice).

Při práci s Polyesterovými pryskyřicemi je nutné dbát zvýšených bezpečnostních a hygienických opatření. Při manipulaci se složkami polyesterové pryskyřice je nutno dbát na dobré větrání pracoviště, ale bez velkého průvanu. Nesmí totiž dojít k přílišné ztrátě rozpouštědla polyesterové pryskyřice (obvykle styrenu) jeho odpařováním. Reaktivní rozpouštědlo zůstává zabudováno v makromolekule vytvrzené pryskyřice. Při nedostatku monomeru rozpouštědla má pryskyřice velmi malou pevnost a nízkou tepelnou odolnost (nedojde k dokonalému vytvrzení ani při správném dávkování složek). Větší množství namíchané směsi obsahující katalyzátor i urychlovač nesmí zůstat dlouho v nádobě, zvláště při větší okolní teplotě, protože exotermický efekt vytvrzovací reakce vede k rychlému zvětšení teploty směsi a případnému želatínování pryskyřice ještě v nádobě. Při nanesení směsi na chladnou formu se exotermický efekt nemůže tak silně projevit. [27]

2.6.3 Vinylesterové pryskyřice (VE)

Jsou to nenasyčené estery epoxidových pryskyřic. Vyrábějí se buď z bisfenolu A nebo jako novolakové VE pryskyřice. Obsahují reaktivní rozpouštědlo (obvykle styren). Makromolekula předpolymeru VE má méně reaktivních míst, než je tomu u UP, dvojná vazba je umístěna pouze na koncích makromolekuly. Důsledkem je menší stupeň zesílení, vedoucí k větší ohebnosti

pryskyřice a větší odolností proti tvorbě mikrotrhlinek. Kompozity s vinylesterovými pryskyřicemi mají větší mezilaminární smykovou pevnost a větší houževnatost než kompozity s nenasyčenými polyestery [46] [51].

Pryskyřice má ve srovnání s UP také:

- lepší odolnost proti korozi,
- větší teplotu skelného přechodu (větší tepelnou odolnost),
- vyšší cenu,
- pomalejší reakci při vytvrzování.

2.6.4 Fenolické pryskyřice – fenolformaldehydové (PF)

Hlavním odbytištěm prepregů s novolakovými fenolickými pryskyřicemi byl donedávna jen letecký průmysl (výroba vnitřních panelů a obkladů u firmy Nelcote, Inc). Nyní se fenolické pryskyřice z bezpečnostních důvodů (pro svou nehořlavost) používají i v konstrukci osobních železničních vagónů (sandvičové panely pro interiéry vagónů s voštinovým jádrem (obvykle z Nomexu a fenolformaldehydové pryskyřice), pro vozy metra a jezdící schody metra. Laminátové konstrukce sedaček byly použity například pro francouzské a italské rychlovlaky. Fenolická pryskyřice, vyztužená uhlíkovými vlákny (uhlíková preforma) je také používána pro ablativní tepelné štíty návratových kabin (TPS, “Thermal Protection System”).

Pro lamináty se používají pouze novolakové PF pryskyřice. Fenol, stejně jako formaldehyd, může být nahrazen vysokomolekulárními aldehydy pro zvýšení ohebnosti, zvětšení reaktivity za nižších teplot a pro zlepšení kompatibility s dalšími pryskyřicemi (tzv. hybridní fenolické pryskyřice). Novolak vzniká kysele katalyzovanou polykondenzační reakcí fenolu s formaldehydem (formaldehyd je v množství menším než ekvivalentním, obvykle 1:0,8), kdy dochází ke kondenzaci v polohách ortho 25 a para. Aromatické skupiny se spojují methylenovými můstky za vzniku nízkomolekulární lineární pryskyřice. Novolakové fenolické pryskyřice se vytvrzují pomocí hexamethylentetraminu (tvrdidlo HMTA) za zvýšených teplot a při relativně vysokých tlacích (nemá-li laminát obsahovat příliš mnoho dutin).

Fenol i formaldehyd jsou jedovaté látky, nezreagovaný formaldehyd se uvolňuje do ovzduší [17] [27] [46].

2.6.5 Kvanoestery (CE)

Mají velkou pevnost, nepatrnou absorpci vlhkosti a výtečné elektrické vlastnosti v porovnání s ostatními pryskyřicemi. Mají obvykle přídavek termoplastu nebo kaučuku pro zvýšení houževnatosti. Nevýhodou je jejich zvýšená cena. Používají se na radomy (kryty radarů letadel), antény a v mikroelektronice (pro desky tištěných obvodů). Jsou také využívány pro svou vysokou tepelnou odolnost pro konstrukce strukturálních dílů v kontaktu s tepelným zdrojem – oblast motorsportu. Setkáváme se s nimi u prepregů [17] [27] [46].

2.6.6 Bismaleimidy (BMI)

Základní složky jsou maleinanhydrid a aromatický diamin. Dále je přidána kyselina bismaleimidová a po cyklohydrataci je získána bismaleimidová pryskyřice. Vytvrzování je podobné vytvrzování epoxidů (vytvrzování adičního typu), bez uvolňování plynů na rozdíl od reaktoplastických PI pryskyřic. Lze je použít jak pro prepregy, tak pro technologie RTM. BMI jsou značně křehké. Ke zmenšení křehkosti jsou BMI pryskyřice plněny termoplasty nebo elastomery. Pryskyřice absorbuje více vlhkosti než EP, jsou náchylné k tvorbě prasklin vlivem opakované expanze a smrštění. Teplota skelného přechodu nové BMI pryskyřice je 320 °C [17] [27] [46].

2.6.7 Speciální pryskyřice

Ve speciálních případech a pro úzké možnosti aplikací se lze dále setkat s těmito pryskyřicemi [17] [27] [46]:

Tvrdé silikonové pryskyřice – teplotní odolnost, nízká relativní permitivita a malý ztrátový činitel předurčují silikonové pryskyřice pro aplikace, kde je důležitá elektrická izolace při velkých teplotách a vysokých frekvencích. Odolnost proti teplotě 220 °C, při krátkodobé výdrži až 600 °C. Hlavní nevýhodou silikonových pryskyřic je jejich menší pevnost v tahu.

Tvrdé polyurethanové pryskyřice (PUR) – houževnatější než polyestery a vinylestery, zvýšená odolnost proti rázu a únavě, dobrá adheze k vláknům, nízká cena, vhodné pro pultruzi navíjení a vstřikování do forem díky rychlému vytvrzení.

Formaldehydové pryskyřice UF a MF – lisování pultruze, RTM, nehořlavé teplotně odolné, MF jsou často využívány pro kompozity s přírodními vlákny.

Furanové pryskyřice – furanové pryskyřice jsou používány tam, kde je vysoká agresivita prostředí (odolávají všem organickým rozpouštědlům, mají výbornou odolnost proti kyselinám a zásadám). Používají se na ochranné nátěry betonu, zdiva a konstrukcí, vystavených agresivnímu prostředí. Maximální teplota použití je 140 °C.

Ftalonitrilové pryskyřice (PN) – teplotně odolné do 450 °C, nehořlavé, netoxické, snadná výroba a aplikace za pokojové teploty.

Reaktoplastické polyimidy (PI) – vysoká teplotní odolnost 397 °C, krátkodobě až 800 °C, křehké.

Biopryskyřice – využitelné jsou deriváty na bázi oleje sóji, kukuřice, cukrové třtiny, řepky olejky a skočce obecného. Oblast výzkumu a inovací vlastností a cena výrobků zatím nedokáže konkurovat dalším komerčním řešením. Největším problémem jsou nízké mechanické vlastnosti a teplotní odolnost. Použití hlavně lisované SMC panely. Kompozity na bázi PLA jsou rozšířené, v posledních letech je ale diskutována jeho recyklace a výroba, i když je zdrojem kukuřičný škrob. Mnoho komerčně uváděných bio pryskyřic mají také jen nahrazenou určitou složku a většina dalších složek není přírodního původu, ani odbouratelná.

2.6.8 Termoplastické matrice

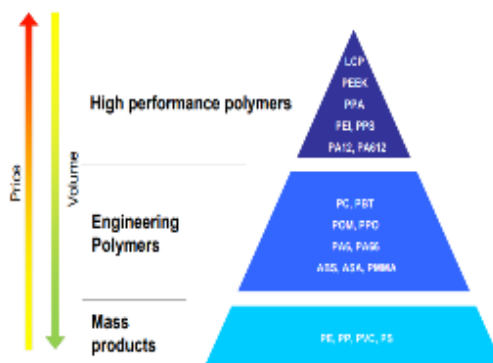
Využití termoplastů jako matrice má několik výhod, zejména se téměř neomezeně prodlužuje doba skladovatelnosti (za vhodných podmínek), produkty mají dobrou chemickou odolnost, neabsorbují vlhkost a mají velmi dobrou houževnatost i rázovou houževnatost. Dovolují také produktivní výrobu v rychlých cyklech, kde není překážka polymerace, ale pouze řízené chladnutí pod tlakem. Jednou z nevýhod jsou technologická omezení na lisování, navíjení a pultruzi.

K nejčastěji používaným patří:

- polyamidy (TPI),
- polyamidoimid (PAI),
- polyaryletherketony (PEEK, PEK, PEKK, PEKEKK),
- polymery s kapalnými krystaly (LCP),
- polyfenylsulfon (PPSU),
- polyethersulfon (PESU),
- polyftalamidy (PPA),

- polyfenylensulfid (PPS),
- polysulfon (PSU),
- polyamid 46 (PA 46).

Oblasti využití se nachází v automobilovém průmyslu, pro různé výztuže, sací potrubí, olejové vany a méně namáhané prvky, v letectví pro interiéry letadel – PPS, PPSU, PEI (polyetherimid), náběžné části křídel. V těchto případech nahrazují díly z hliníkových slitin, obr. 2.19.



Obr. 2.19 Rozdělení termoplastů [52].

K dalším výhodám termoplastických matric patří jejich možná recyklovatelnost. Dají se poměrně dobře svařovat i v sériových podmínkách produkce, naopak je u nich horší možnost lepení než u termosetů. K dalším nevýhodám patří produkce, která je díky vysoké viskozitě vstupního materiálu náročnější a vyžaduje rozsáhlé technické vybavení a know-how. K dalším výhodám patří cena oproti termosetům.

Vstupní materiál je kromě aplikace vstřikování ve formě prepregu nebo předsycených desek, které jsou nařezány na požadovaný rozvinutý tvar, následně se předtvarují v lisu (preform) a následně lisují za tlaku 10–100 Bar a teplotách 100–300 °C, dle matrice. Celou výrobu lze automatizovat a tím zvýšit její propustnost a sériovost. Další možností je prosycení při výrobě využitím fólie vkládané mezi výztuž nebo nanesení ve formě prášku. U netkaných materiálů a cupanin lze mísit výztuž ve vstřikovací hlavě.

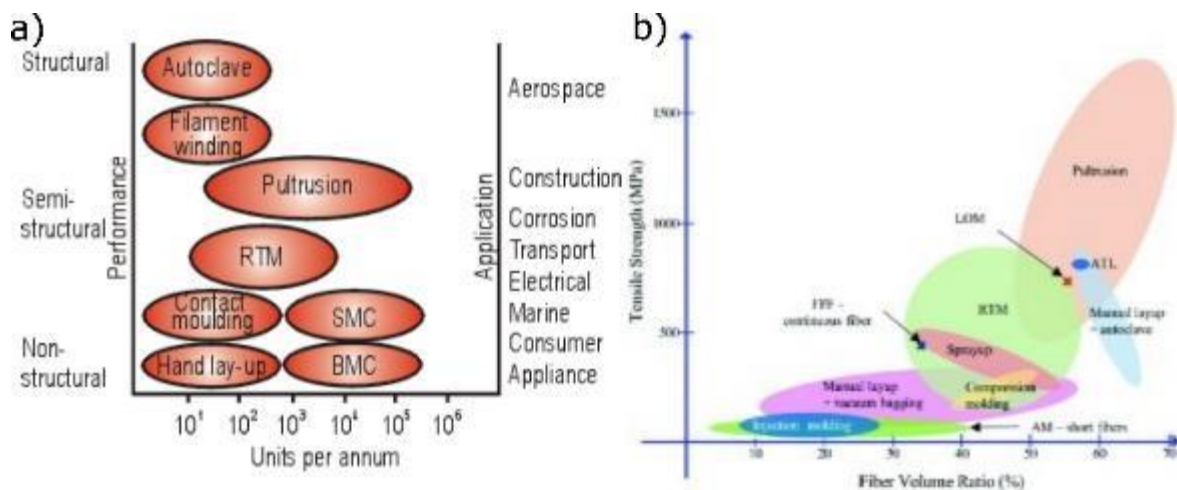
2.7 Technologie výroby kompozitních materiálů

Existuje nepřehledné množství technologií výroby kompozitních materiálů. Některými technologiemi lze dosáhnout zdánlivě podobných výsledků, mechanické vlastnosti se však mohou výrazně lišit. O volbě technologie vždy rozhoduje více faktorů, jsou to zejména: ekonomické, typ výztuže a matrice, mechanická odolnost, teploty zpracování, tvar a velikost součásti, sériovost, estetické vlastnosti atd. Vybrané funkční parametry na zvolené technologii lze nalézt na obr. 2.20. Níže jsou popsány základní technologie a jejich dělení dle typu využívané matrice a jejich vlastností. Dělení vychází z předpokladu, že matrice je ve stavu tekutém pro termosetické matrice nebo tuhém v případě termoplastických kompozitů.

Přehled technologií výroby laminátů:

- mokré kladení,
- stříkání – Spray-Up,
- navíjení – oplétání,
- pultruze,

- SMC-BMC lisování,
- RT(X) technologie:
 - RTM
 - LRTM
 - HP-RTM
 - VARTM - Infuze
- kladení prepregů – autokláv,
- lisování,
 - lisování prepregů
 - mokré lisování
- automatické kladení vláken.



Obr. 2.20 a) závislost výrobní dávky na kvalitě kompozitu v závislosti na výrobní technologii [53],
b) závislost objemu vláken na pevnosti pro různé výrobní technologie [54].

V dalším textu jsou vybrány pouze technologie využití v této práci, další technologie zmíněné ve výčtu jsou dobře popsány v podkladech pro výuku zpracovaných autorem této práce pro Univerzitu obrany [14].

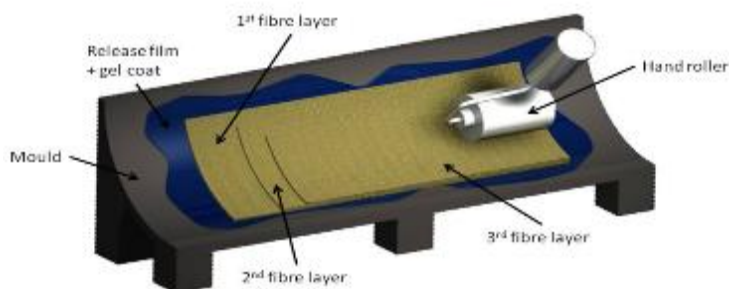
2.7.1 Mokré kladení

Jedná se o nejjednodušší technologii, viz obr. 2.21, která vyžaduje minimální technické vybavení. Na druhou stranu je mokré kladení náročné na zručnost obsluhy a je téměř nemožné vyvarovat se vzniku porozity v pryskyřici a je obtížné dosáhnout přesně definovaného prosycení [18].

Pro výrobu je třeba jednodílná forma. Kvalita jejího povrchu ovlivňuje kvalitu vyrobeného dílu, často bývá leštěná. Formy lze získat otiskem modelového dílu nebo přímo obráběním. Materiály forem budou probrány dále. Používá se suchá tkanina, která se ručně prosycuje pryskyřicí [16].

Před kladením je formu nutné ošetřit separátorem, což umožní oddělení vytvrzeného dílu od formy. Jako první vrstva bývá využíván tzv. gelcoat s tloušťkou 0,3 až 0,6 mm. Tento slouží jako ochrana kompozitu proti UV záření, vlivu prostředí, zároveň je možné gelcoat obarvit,

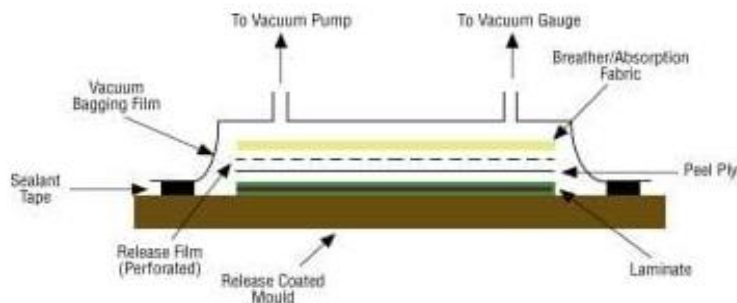
a tak dostat barevný povrch. Další funkcí gelcoatu je zabránění vzniku porozity na povrchu součásti a eliminace možných chyb výroby. Gelcoat se nanáší stříkáním nebo nátěrem [16].



Obr. 2.21 Technologie mokrého kladení [55].

Následuje kladení tkanin nebo rohoží, které se postupně prosycují pryskyřicí pomocí válečku, štětce nebo stříkací pistole. Je nutné co nejpečlivěji vytlačit většinu bublinek, které by po vytvrzení snižovaly pevnost kompozitu. Pomocí ručního laminování (viz obr. 2.22) s dobře provedeným odstraněním přebytečné pryskyřice lze dosáhnout až 50% objemového podílu vláken. Ve většině případů je ale hodnota vyšší. Pokud jsou využity rohože, tento podíl se snižuje na hodnotu 20–30 %. Lze takto pracovat s většinou běžných pryskyřic, pokud je doba zpracování úměrná složitosti dílu. V případě využití tkanin a požadavku na kvalitnější zadní plochu laminátu se využívá jako poslední vrstva strhávací tkanina, která odstraní malé množství pryskyřice a kompaktní povrch dílu, tato je po vytvrzení dílu odstraněna. Její další výhodou je, že připraví povrch dílu pro další operace, jako je třeba lepení.

Odstranění bublin a přebytečného epoxidu lze podpořit aplikací vakua na formu. V případě využití vakua je na prosycenou tkaninu umístěna separační fólie, zabraňující přilepení dílu na další vrstvy. Tuto fólii můžeme aplikovat jako děrovanou v případě, kdy je třeba odsát přebytečný epoxid, nebo neděrovanou. Na separační fólii se klade již odsávací tkanina, která slouží k distribuci vakua přes celý díl. Poslední vrstvou je vakuovací fólie, která je pevnější a pružnější (100–300 %) aby mohlo být aplikováno vakuum. Zdrojem vakua je vývěva s hadicemi připojenými k dílu buď pomocí speciálního ventilu, anebo je hadice pouze vložena a utěsněna stejně jako vakuovací fólie pomocí těsnící pásky (2–5 mm tlustá páska – nejčastěji butylkaučuk). V některých případech, kdy je třeba odstranit větší množství pryskyřice, se využívá ještě tzv. sací vrstva, pod kterou je děrovaná fólie a nad ní neděrovaná separační fólie.



Obr. 2.22 Schéma skladby dílu při ručním laminování s využitím vakua [56].

Vytvrzení probíhá za pokojové teploty nebo v peci podle konkrétní použité pryskyřice. Při použití tepla je třeba zvážit možnost vzniku exotermické reakce a teplotní odolnost všech využitých materiálů. V případě temperace nebo využití smrštivých pryskyřic (polyester) je třeba řešit teplotní kompenzace velikostí dílu/formy.

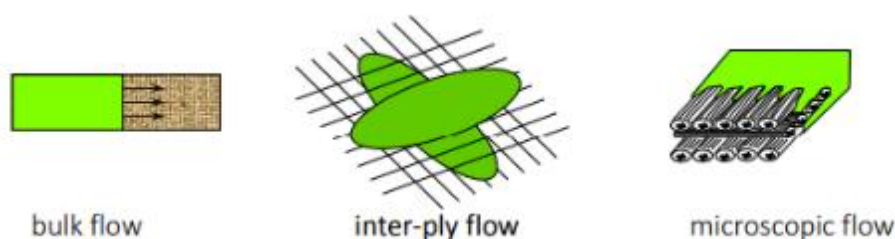
2.7.2 Resin transfer technologie

U této skupiny technologií se stejně jako při kladení za mokra používá suchá tkanina, způsob sycení je však odlišný. Pryskyřice, která je v tekutém stavu, je nasávána rozdílem tlaků do dvoudílné nebo jednodílné formy překryté vakuovou fólií. Proces prosycení je závislý na mnoha faktorech, jako jsou rozdíl tlaků před tekutinou a v tekutině, prostupnost prostředím a viskozitou samotné pryskyřice. Při bližším studiu je třeba se zaměřit na tři úrovně řešení problému. Microscopická oblast řeší smáčení jednotlivých vláken a působení tekutiny v oblasti mikrokapilár, oblast mezo sleduje chování pryskyřice mezi jednotlivými vrstvami a působení v rámci rozdílných struktur prostředí – tkanina vs. jednosměrné materiály. Makro měřítko již hodnotí proces proudění v konkrétním dílu, pracuje se s komplexní geometrií a vychází z modelů uvedených níže, obr. 2.23. Pokud budeme pracovat na úrovni mezo-makro, pak pro obecné stanovení objemového průtoku lze uvést Darcyho zákon, tento byl ovšem stanoven pro proudění kapalin sypaným podložením pro oblast geologie, ale lze s ním poměrně dobře pracovat i v případě tkanin a kompozitů.

$$\frac{Q}{A} = \frac{K}{\eta} \cdot \frac{\Delta p}{L} \quad (2.30)$$

Kde Q je objemový průtok, K je permeabilita výztuže, η je viskozita matrice, Δp je tlakový gradient, A je plocha průřezu a L je délka dráhy. Ve vzorci figuruje konstanta K , kterou je nutné stanovit experimentálně pro danou tkaninu a pryskyřici, je závislá nejen na geometrii tkaniny, ale i na vlastnostech dané pryskyřice, jako je smáčení a změna viskozity závislá na teplotě a tlaku. V posledních letech lze tento proces i výpočetně simulovat ve specializovaných softwarech jako je PAM – RTM (Esi Group), Autodesk Moldflow, MyRTM, Ansys Fluent a mnoho dalších.

V případě, že ve formě dojde k nekonstantním podmínkám vlivem rozdílné tloušťky, nevyplnění materiálem výztuže nebo k defektům výztuže, může dojít k nestejnomyému průtoku pryskyřice a tato si hledá „cestu nejmenšího odporu“. V takovém případě hrozí neprosycení celého objemu nebo tvorba suchých míst. Z tohoto důvodu je také velmi důležité správné umístění vtoku pryskyřice a ventilačních míst (přívod vakua). Další vadou, která se více projevuje u dílů vytvořených pomocí vakua než u RTM vstřikováním, je přítomnost bublin a porozity, tato je nejčastěji způsobena netěsností formy nebo bublinami vzduchu v namíchané pryskyřici a krátkém čase pro jejich odstranění vakuem.



Obr. 2.23 Různé pohledy na sycení pryskyřice [57].

Podle způsobu sycení a přívodu tlaku rozlišujeme různé varianty infuzních technologií [18]:

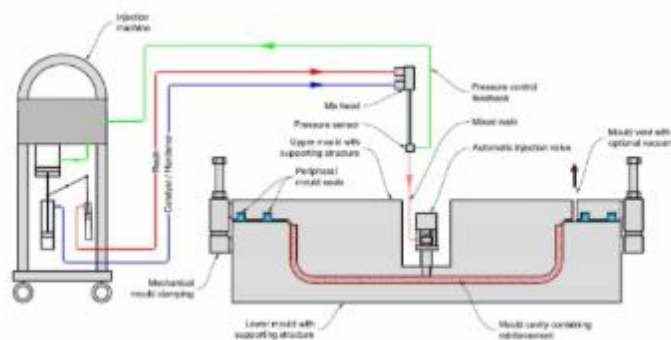
- RTM – Resin Transfer Moulding,
- VARTM – Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding (infúze),
- HP RTM – High Pressure Resin Transfer Moulding,
- Light RTM,

- RFI – Resin Film Infusion,
- IM – Injection moulding.

RTM Resin Transfer Moulding

Jde o technologii, které nalézají využití při výrobě přesných dílů ve středních a větších sériích. Základem je dvoudílná forma, do které se umístí suchá tkanina. Forma musí být dobře utěsněná, protože se do ní pryskyřice vstříkuje pod tlakem 0,4–5 MPa. RTM má velký význam v automobilovém průmyslu, kde se využívá v kombinaci s preformy. Lisování dílů karoserie touto technologií má pracovní cyklus do 10 minut. Princip RTM je vyobrazen na obr. 2.24. Jednou z výhod této technologie je přesná geometrie dílu a pohledová kvalita dílu ze všech stran. U této technologie se dosahuje větších poměrů výztuže vůči matici. Vytvrzení probíhá přímo ve formě za zvýšené teploty, forma je vyhřívána a chlazena pro dosažení co nejrychlejších časů výroby, také je třeba uvažovat s robustností celé formy a lisu, aby byl schopen udržet tlak vstřikování, např. forma o ploše 2 m² plněná tlakem 0,4 MPa vyvine sílu na lis 73 tun. Použitá pryskyřice musí mít malou viskozitu, aby proces proběhl rychle a plnění bylo efektivní, je také důležité optimalizovat rychlost proudění, aby nedocházelo ke shrnutí tkaniny.

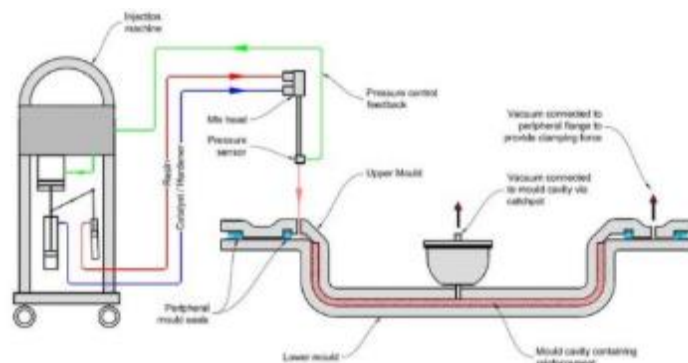
Preformy jsou vyráběny buď lisováním tkaniny, anebo rohoží s malým množstvím pryskyřice (jednotky procent) pro její stabilizaci. Často se zde projevují problémy se smekáváním vláken na hranách a kumulací vláken v protějších místech, také orientace vláken se během lisování mění, při hlubokých tvarech může nastat krčení tkanin. Těmto problémům lze předejít i díky fomulacím – formability, draping simulation. Velmi často se lze také setkat s preformy ve formě 3D, které jsou vyrobeny naplétáním nebo sešíváním a prošíváním tkanin ve 3D. Tyto vykazují dobré vlastnosti jak mechanické pevnosti, tak při plnění a proudění pryskyřice.



Obr. 2.24 Technologie RTM [58].

Light RTM

Odlišnosti od metody RTM je využití nižších tlaků a využití vakua ke vstřikování pryskyřice. Tlaky se pohybují v hodnotách (0,1–0,3 MPa) za současného působení vakua. Díky tomu lze formy odlehčit a vyrobit i z kompozitních materiálů, tím se značně sníží náklady. Výhodou metody je použití zařízení pracující s nižšími tlaky a obě pohledové strany výrobku. Forma již musí být vyrobena s těsnícími prvky a přívodem pryskyřice. Kompozitní formy jsou umístěny do ocelového rámu kvůli zvýšení tuhosti. Lze použít Gelcoat základu a veškeré materiály, včetně sandwich konstrukcí. Schéma je zobrazeno na obr. 2.25.



Obr. 2.25 Light RTM princip [58].

HP RTM (High Pressure RTM)

Vstřikování pryskyřice za vysokého tlaku (1–12MPa) do přesných ocelových forem za použití preformů, pryskyřice je velmi reaktivní ve vyhřáté formě. Takt výroby je cca 5–10 minut ve formě. Celý proces je automatizován do výrobní linky od stříhu materiálu, výroby preformu až po vstřikování a ořez součásti. Náklady na takovou linku jsou velké, z toho důvodu je uplatnění pouze pro velké série dílů automotive. Díly jsou také díky omezením a časům s malým podílem vláken - cca 30 % váhově.

VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding) – infuze

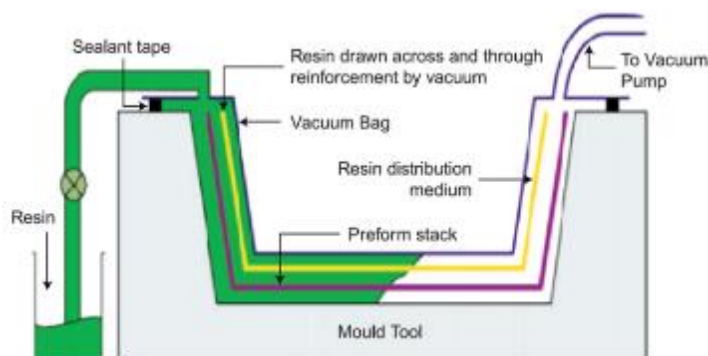
Z názvu je patrné, že se jedná o podobnou technologii jako RTM s tím rozdílem, že důležitou roli hraje podtlak. Místo toho, aby byla pryskyřice vstřikována pod vysokým tlakem, je součást umístěna pod vakuovou fólií, ze které je odsát vzduch. To má za následek vznik podtlaku, který pryskyřici nasává a formuje výztuž do formy. Vzhledem k její jednoduchosti se jedná o rozšířenou technologii u malých sérií a pro kusovou výrobu.

Pro VARTM se používá jednodílná forma. Kvalita jejího povrchu určuje kvalitu jedné strany kompozitního dílu. Stejně jako u ostatních technologií je nutné formu před laminací ošetřit separátorem pro snazší vyjmutí vytvrzeného dílu. Pracovní postup kladení je obdobný jako u ostatních ručních metod popsaných výše. Pro lepší soudržnost vrstev během kladení bývá použito lepidlo ve spreji nebo oboustranné lepicí pásky ze skelného vlákna.

Schéma technologie zobrazuje obr. 2.26. Po naskládání všech vrstev tkaniny se umístí strhávací tkanina („peel ply“), která slouží k úpravě povrchu zadní části dílu a k distribuci vakua, RDM (Resin Distribution Medium – vrstva usnadňující tok pryskyřice) a součást se vloží do vakuové fólie. Z vakuové fólie jsou vyvedena dvě ústí hadic – ventilů. Jedním je přívod pryskyřice z rezervoáru, který je před použitím vakuován k odstranění bublin vzniklých mícháním. Druhá hadice je napojená na vývěvu, která odsává z vakuové fólie vzduch. Před vývěvou je nádobka pro zachycení přebytečné pryskyřice, tzv. „catch pot“. Strhávací tkanina přesahuje díl ve všech směrech a rozvod vakua a pryskyřice leží na ní, rozvodné médium (síťka) by měla končit cca 20–30 mm před koncem dílu kvůli srovnání čela toku pryskyřice a lepšímu prosycení konce dílu.

Klíčovým parametrem je těsnost formy. Před samotným napuštěním se několikrát kontroluje a testuje, zda není únik vakua, žádoucí je vakuum pod 0,8 Bar. Samotný test je úspěšný, pokud během 15 minut, když je díl odpojen od vývěvy, není rozdíl v podtlaku větší než 0,1 Bar. U symetrických dílů bývá umístěn vpust' pryskyřice uprostřed dílu, u větších dílů bývá více vpustí. Zjednodušeně lze říct, že vzdálenost vpustí od kraje dílu nebo další by neměla být větší než 0,9 m. Pokud je více vpustí, bývají otvírány postupně a odděleny do sekci pruhy strhávací tkaniny bez rozvodné sítě. Jakmile pryskyřice dorazí k okraji dílu, je přívod zavřen a díl

ponechán pod vakuem minimálně po dobu gelace, lépe do druhého dne. Jistou nevýhodou této metody je produkce odpadu z přídavných materiálů, které nelze znovu využít. V některých případech lze vyrobit silikonovou plachetku nahrazující vakuovou fólii a tu znovu použít (vydrží cca 100 dílů).



Obr. 2.26 Technologie VARTM [59].

Kromě citlivosti na únik vakua je třeba kontrolovat množství namíchané pryskyřice a nebezpečí exotermické reakce spolu se správným množstvím. Další problémem, který může nastat díky rozdílnosti tlaků, je nerovnoměrné rozložení tloušťky dílu a s tím související podíl pryskyřice v dílu. Tyto problémy z části řeší pokročilé metody VARTM – jsou to zejména SCRIMP, VIP, RI, CVI, VAP. U těchto metod se jedná zejména o různá distribuční média a regulaci podtlaku na vstupu a výstupu. Setkat se lze i s použitím dvojité vakuové fólie – tzv. "Double bag systém". Pomocí VARTM technologií lze efektivně vyrábět i díly velkých rozměrů, jako jsou lopatky větrných elektráren nebo trupy lodí o délkách až 30 m.

2.7.3 Kladení prepregů

Tato technologie využívá tzv. prepregů. Tak se označuje již předimpregnovaná/předsycená tkanina nebo rohož. Nejčastěji se jedná o prepregy s termosetickou pryskyřicí – epoxid, fenol, cyanoester. Při výrobě prepregu je tkanina strojově prosycena, avšak vytvrzovací reakce je zastavena změnou teplot.

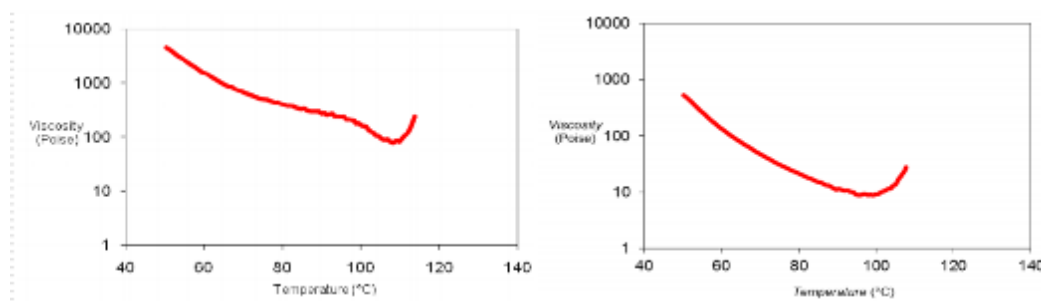
Jak bylo zmíněno výše, moderní epoxidy vykazují vysokou houževnatost. Dříve tomu tak nebylo a s tím souvisí i samotná výroba prepregu. Ten byl vynalezen v 60. letech minulého století právě proto, že se s tehdejšími pryskyřicemi špatně pracovalo. Nebyly dostatečně smáčivé, a tak výrobci uvítali možnost použití již předimpregnovaných tkanin. Ke kompozitním dílům má i dnes mnoho lidí nedůvěru, která je zakořeněná mimo jiné v údajné křehkosti materiálu. Křehkost byla závažný problém na začátku vývoje uhlíkových kompozitů, kdy vytvrzování neprobíhalo za vysokých tlaků a teplot, a tak nedocházelo k dokonalému vytvrzení a součásti měly velké množství bublin a kazů [31].

Prepregy se však neomezují pouze na uhlíková vlákna, mohou být také ze skelných nebo hybridních tkanin (např. aramid-karbon).

Mezi hlavní výhody patří konstantní a definované prosycení vláken pryskyřicí, nízká porozita. Obsah (váhový) je mezi 30–50 %. Pryskyřice nanesená na prepregu je již zreagovaná ve fázi B-stege, její reakce je ovšem zastavena působením teploty. Z toho plyne nevýhoda prepregu, a to je omezená životnost, která je pro běžné prepregy s epoxidovými pryskyřicemi při pokojové teplotě cca 30 dní. V teplotě -19 °C se tato životnost prodlužuje až na 1 rok. U formovacích pryskyřic určených k nízkoteplotnímu vytvrzení se setkáme s životností 3 dny při pokojové teplotě.

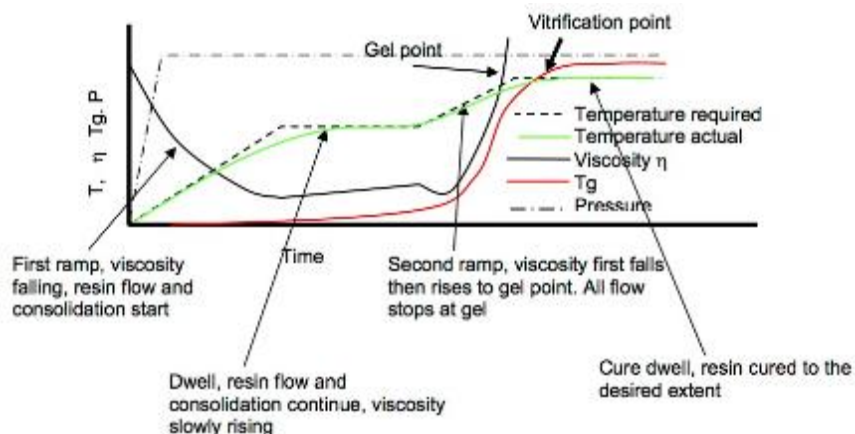
Výroba prepregů může probíhat dvěma způsoby – Hot melt Proces, ve kterém je pryskyřice ve formě fólie nanášena na suchou tkaninu a přítlačnými a ohřívacími válci spojena s tkaninou. Druhým procesem je Solvent, kdy je pryskyřice rozpuštěna v rozpouštědle a suchá tkanina prochází vanou se směsí, následně se rozpouštědlo vypaří a na tkanině zůstává pouze pryskyřice. V obou procesech je v konečné fázi na prepreg nanášena ochranná fólie proti přilepení při namotávání na roli a pro snadnější manipulaci. Prepreg je vždy za pokojové teploty lepivý, mnozí výrobci dokáží lepivost přizpůsobit zákazníkovi a aplikaci. V případě nutnosti lze zvýšit lepivost aplikací horkého vzduchu nebo naopak snížit zamražením. Běžná role obsahuje 30–50 m tkaniny. Při manipulaci před výrobou je nutné dbát zvýšené pozornosti před vlhkostí. Prepreg nasává vzdušnou a okolní vlhkost a ta dále způsobuje porozitu výsledného dílu (vypařování při vyšších teplotách, chemická reakce s rozpouštědly).

Vytvrzování prepregů probíhá za zvýšených teplot, jeho průběh lze vyčíst z TTT diagramu. Ten ovšem výrobci prepregu nedodávají. Nejčastěji se uživatel setká s grafem viskozity závislým na teplotě, viz obr. 2.27. Zde jsou uvedeny dvě různé pryskyřice výrobce, každá pro jiný účel a teploty vytvrzení.



Obr. 2.27 Graf viskozity závislý na teplotě [60].

Z grafu na obr. 2.27 lze vyčíst při jaké teplotě má materiál nejnižší viskozitu, jaká je tato viskozita a při jaké teplotě již nastává gelovatění, případně exotermní reakce. Důležitou informací je také doba vytvrzení a doba gelace. Z tohoto digramu lze pak snáze stanovit průběh teplot a časů potřebných k vytvrzení. Vytvrzení je možné buď v autoklávu, pod vakuem nebo v lisu, tlak je vždy nutný. Dle použití se liší i pryskyřice, jejich viskozity, doby zpracování a maximální teploty. V případě autoklávu se setkáváme s produkčními pryskyřicemi s teplotami vytvrzení 120–180 °C s vytvrzením po 60–120 min. V případě vytvrzení pod vakuem (OOA – Out Of Autoclave) jsou teploty nižší (80–120 °C) a doby zpracování delší – 120 min a více. V případě lisování se lze setkat i s rychlými systémy, kdy doba vytvrzení je 5–15 min. při 110–50 °C. Typický cyklus vytvrzení s průběhy viskozity, maximální teploty, tlaku a teploty lze vidět na obr. 2.28.



Obr. 2.28 Graf vytvrzení prepregu v autoklávu [25].

Tento graf na obr. 2.28 je pouze obecný, v praktickém využití se lze setkat s různými grafy pro jeden materiál. Vytvrzení je také závislé na materiálu formy – rychlost prohřívání, geometrii dílu a množství prepregu, Také se může různě chovat autokláv při plném obsazení formami a při prázdném prostoru, kdy se každá jeho část může ohřívat/ochlazovat jinou rychlostí. U běžného systému má graf následující průběh:

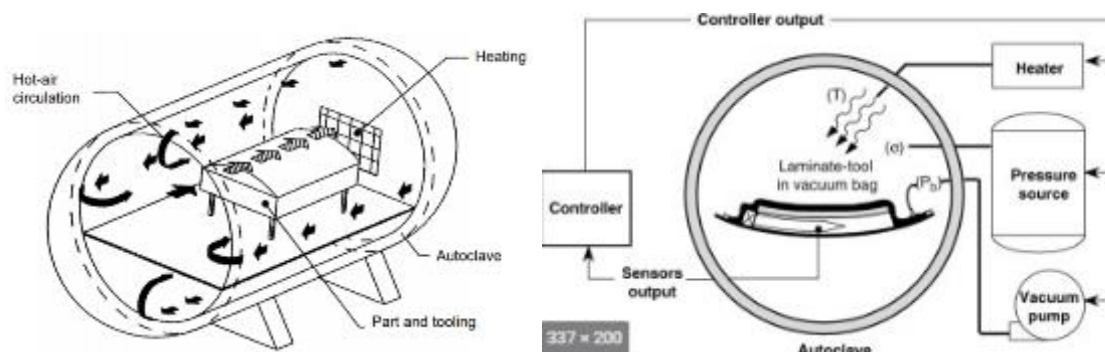
1. Tlak stoupá (ramp) na maximální hodnotu, teplota po 2 °C/min do bodu nejnižší viskozity, vakuum zapnuto.
2. Přestávka (Dwell), konstantní teplota, max. tlak, vypíná se podtlak – ventilace do atmosféry pro odchozí plyny a uzavřené póry 10–20 min.
3. Rampa na teplotu vytvrzení – dosahuje se minimální viskozity a pryskyřice přechází do gelovatění – ustává tekutost, veškerá pórovitost a defekty jsou již nevratné.
4. Výdrž na teplotě – vytvrzení, stále maximální tlak.
5. Chlazení – pod maximálním tlakem, pokles 2 °C/min – zabraňuje deformacím dílu.
6. Uvolnění tlaku – vytvrzený díl s maximální T_g .

Postup lze modifikovat pro jednoduché díly s málo vrstvami. Lze přeskočit přestávku, naopak pro složité je třeba ji prodloužit. Jedním z hlavních kritérií je pórovitost výsledného dílu. Formu lze vyrobit z různých materiálů v závislosti na požadavcích na různé faktory.

Autokláv

Autokláv je tlaková nádoba s řízenou atmosférou, viz obr. 2.30, maximální tlaky pro běžnou výrobu z prepregů jsou maximálně 10 Bar při teplotách do 200 °C . Pro speciální účely a teplotně odolné materiály lze pracovat s teplotami až do 400 °C . Dále autokláv obsahuje prostory pro vakuum a napojení dílu k jeho zdroji, obsahuje také teplotní čidla – termočlánky (typ J, K), které se umísťují na díl a formu pro účely teplotní regulace. Důležitým aspektem je rovnoměrnost a řízení teploty v celém prostoru. U dnešních autoklávů to zajišťují PLC s regulací, která je řízena čidly v prostoru autoklávu umístěnými na díle nebo formě. Možnosti regulace pak může ovlivnit uživatel – vzduch vs. forma. Konstantní teplota je zajištěna prouděním pomocí ventilátoru. Vytápění je možné buď elektricky – odporová tělesa, plynem nebo párou z externího zdroje. Pro vyšší teploty ($\geq 300\text{ °C}$) se využívá atmosféra inertního plynu (dusík). Nejdůležitější bezpečnostní prvek a konstrukčně složitější jsou dveře a jejich

utěsnění, to probíhá přetlakem těsnění a za pomoci masivních přírub. O ceně autoklávu mnohdy více rozhoduje jeho průměr a složitost ovládání dveří než jeho délka. Celý cyklus (kromě řízení teplot) lze ovládat automaticky nebo manuálně pomocí ventilů pro vakuum, přívodu tlaku a větrání.



Obr. 2.30 Schematicky znázorněný autokláv [61].

Velikosti autoklávů se pohybují, průměr je 0,5 m až 9 m, v délce 0,5 m až 100 m. K autoklávu patří také jeho příslušenství, bez kterého je jeho funkce nemožná. Jedná se zejména o vodní hospodářství s chladicí vodou, tj. čerpadla, zásobníky a chlazení. Systém vývěv pro díly čekající na zpracování a na díly v autoklávu, tlakování autoklávu – výkonný kompresor (několik) dle velikosti autoklávu a požadavku na rychlost tlakování, vozíky pro manipulaci a zavážení dílů. Velikost autoklávu ovlivňuje jeho energetickou náročnost a požadavky na periferie.

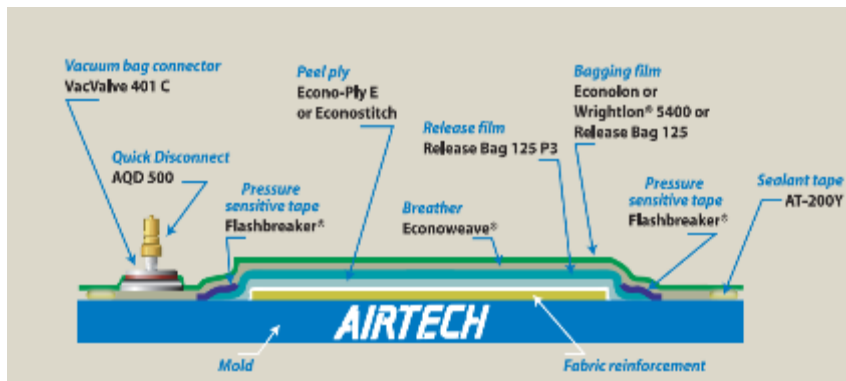
Skládání dílu – Lay Up

Základní materiál je automaticky nebo ručně nařezán a připraven v chladicích boxech pro skládání. Prvním krokem je separace forem, dnes jsou využívány Semi permanentní separátory na bázi rozpouštědel nebo vodního základu. Na formu jsou zvolené prepregy kladeny dle listu skladby, který je navržen na základě požadovaných vlastností dílu. Z estetického hlediska je také důležitá orientace světelných linií tkanin. Podobně jako u RTM je důležité vrstvy prepregu uhladit, obzvláště v rozích a malých rádiusech, kterým je však vhodné se při konstrukci formy vyvarovat. Klazení lze zjednodušit a poloautomatizovat pomocí laserové projekce jednotlivých nástřihů přímo na formu.

Další vrstvou je volitelná strhávací (odtrhová tkanina – peel ply), tato slouží podobně jako u infuze k odvodu plynů vznikajících nebo uzavřených v tkanině během procesu vytvrzování, také připravuje povrch pro další operace a může odstranit malé množství nechtěné pryskyřice. Na tuto tkaninu se položí separační fólie (release film) neděrovaná, ve starší literatuře se užívala děrovaná pro odtok přebytečné pryskyřice, to ovšem u moderních prepregů s přesným poměrem pryskyřice již není třeba. Pro rozvod vakua přes celý díl je položena odsávací rohož (breather), vyrobená z netkaných vláken PES o vyšší gramáži. V této fázi je umístěn ventil pro odsávání a celý díl je uzavřen do vakuové fólie pomocí vakuovací těsnící pásky (butylkaučuk). Všechny pomocné materiály musí být průtažní minimálně 250 %. Následuje vákuování, při kterém musí být všechny vnitřní rádiusy a rohy dokonale přitlačeny k dílu, nesmí se tvořit tzv. mosty, kdy fólie nedoléhá k dílu a formě. Vrstvy a materiály jsou zobrazeny na obr. 2.31.

V těchto místech by za působení tlaku v autoklávu došlo k protržení fólie a zničení dílu. Při výrobě složitějších a náročnějších dílů může být ještě umístěno do dílu teplotní čidlo, které sleduje teplotu dílu – zabraňuje exotermní reakci v případě rychlého zahřívání nebo naopak

prodlužuje dobu cyklu, dokud se díl neohřeje na danou teplotu. Pokud jsou vyráběny díly o více než 3–4 vrstvách, tak se při výrobě zařazuje mezioperační vakuování pro správnou kompaktnost vrstev prepregu. V místech se složitým tvarem lze také využít kaučukových (silikonových) dotlačovacích prvků, které pomáhají formovat prepreg do formy.

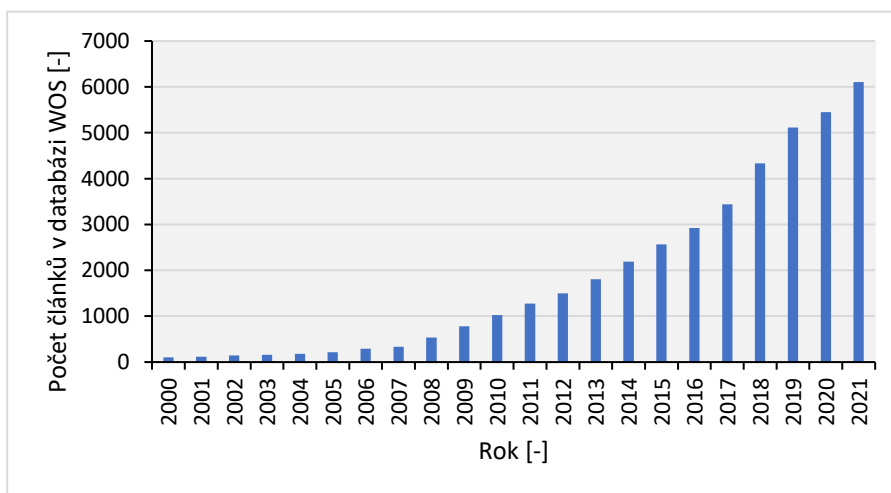


Obr. 2.31 Jednotlivé vrstvy a pomocné materiály pro vytvrzení v autoklávu [62].

Při vytvrzování dílu mimo autokláv se postupuje stejně, jen je větší důraz kladen na průběžné vakuování a čistotu materiálů. Díl musí být precizně naskládán díky chybějícímu tlaku autoklávu.

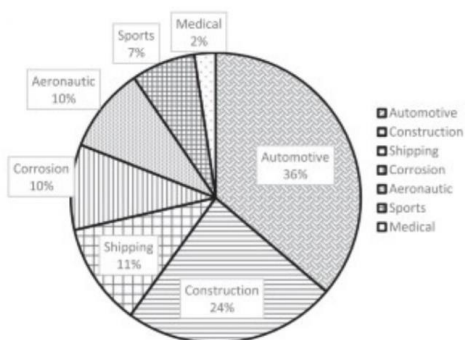
3 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ – KOMPOZITY S PŘÍRODNÍMI VLÁKNY

Téma použití přírodních vláken je dnes velmi rozšířeno a věnuje se mu mnoho výzkumů zejména z oblastí 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 Polsku. Na obr. 3.1 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 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 je to ČVUT a VUT v Brně se zaměřením na stavební materiály a princip recyklace.



Obr. 3.1 Počet publikací odpovídající vyhledávání „natural fibre composite“ v databázi WOS.

Aplikační potenciál, viz obr. 3.2 přírodních vláken uvádí ve své studii Khan et.al [63] na základě zkoumání mechanických vlastností jednotlivých vláken s přihlédnutím k ekologickým a enviromentálním aspektům, obr. 3.3.



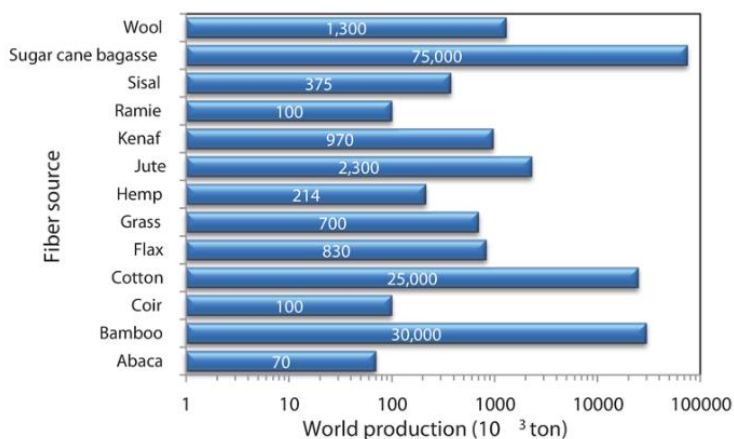
Obr. 3.2 Aplikační potenciál přírodních vláken v kompozitech [63].



Obr. 3.3 Životní cyklus kompozitního výrobku z přírodních vláken [63].

Na druhé straně lněná a jiná přírodní vlákna otevírají nové možnosti pro KPV s vysokým poměrem tuhosti, hmotnosti a lepší recyklovatelností [64] [65]. 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 [66] [67]. Peças a kol [68] předložili ucelený přehled vlastností vybraných přírodních vláken používaných jako výztuže v kompozitních materiálech. Jako jedny z nevhodnějších 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 [69]. Kandemir a spol. studovali [70] 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. 3.4. Je zde patrné, že nejvíce jsou produkovány ty vlákna, kde je hlavním produktem jiná část rostliny, nebo její využití má tradici mimo kompozity.



Obr. 3.4 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. [71] 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) [72]. 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 [73]. Vedle citlivosti na vodu je nevýhodou přírodních vláken také proměnlivost mechanických vlastností. Přesto výzkumníci vyvinuli úpravy, které mají uvedené problémy eliminovat, např. ve studii Whitacre et al. prezentovali [74] 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 [75] 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 %.

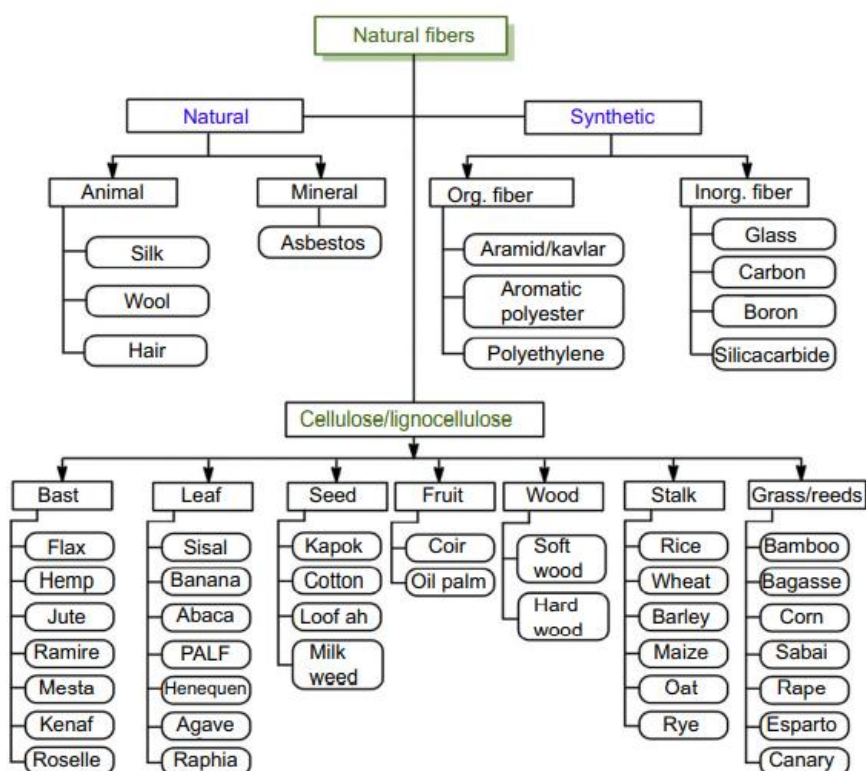
Další z nesporných výhod je problematika vibrací, výzkumníci a průmyslové podniky neustále hledají strategie tlumení vibrací a hluku v různých aplikacích, jako je automobilový, letecký, námořní a sportovní průmysl. Tlumičí schopnost přispívá ke zvýšení trvanlivosti konstrukcí, zejména proti únavě, a k jejich odolnosti proti rázu. Bastická vlákna (len, konopí, juta nebo kenaf) vystupují jako nejslibnější výztuže díky své dostupnosti a dobrým tlumícím 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

3.1 Přírodní vlákna

Základní dělení přírodních vláken lze vidět na obr 3.5, 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 je 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 využívány vlákna lnu, konopí, juty, sisalu, kenafu, méně využívaná jsou vlákna datlové palmy, banánovníku a bambusu.



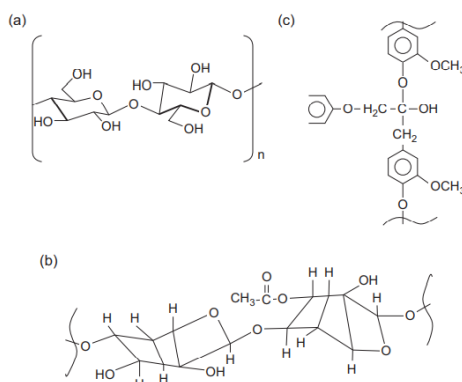
Obr. 3.5 Klasifikace přírodních vláken [76].

Z chemického hlediska je složení vláken tvořeno zejména celulózou, hemy celulózou, ligninem, pektinem tuky, vosky a vodou rozpustnými látkami. Chemické složení jednotlivých sloučenin hraje významnou roli ve výsledných vlastnostech vlákna. Jednotlivá složení pro typická vlákna jsou uvedena v tabulce 3.1. Je patrné, že kokosová vlákna mají nejnižší obsah celulózy a vykazují nejnižší pevnost v tahu ze všech ostatních přírodních vláken. Nižší obsah celulózy přispěl k nižší pevnosti a modulu pružnosti. Přírodní vlákna jsou tvořena převážně celulózou, a to biopolymeru rostlinného cukru glukózy. Na druhé straně jsou vlákna lněná, která vykazují vysoký podíl celulózy a hemicelulózy a dosahují nejlepších hodnot jak v takových, tak ohybových pevností.

Tab. 3.1 Chemické složení vybraných vláken [77].

Fibre	Cellulose	Hemicellulose	Lignin	Wax [wt. %]	Moisture [wt. %]
Date palm fibre	46	-	20	-	-
Flax	71	18,6-20,6	2,2	1,5	7
Hemp	68	15,0	10	0,8	9
Jute	61-71	14,0-20,0	12-13	0,5	12
Bamboo	26-43	30,0	21-31	-	8,9
Kenaf	72	20,3	9	-	-
Cotton	82,7	5,7	-	-	-
Sisal	65	12,0	9,9	2	11
Oil palm fibre	65	24,2	19	-	-

Chemické složení celulózy, hemicelulózy a ligninu je uvedeno na obrázku 3.6.

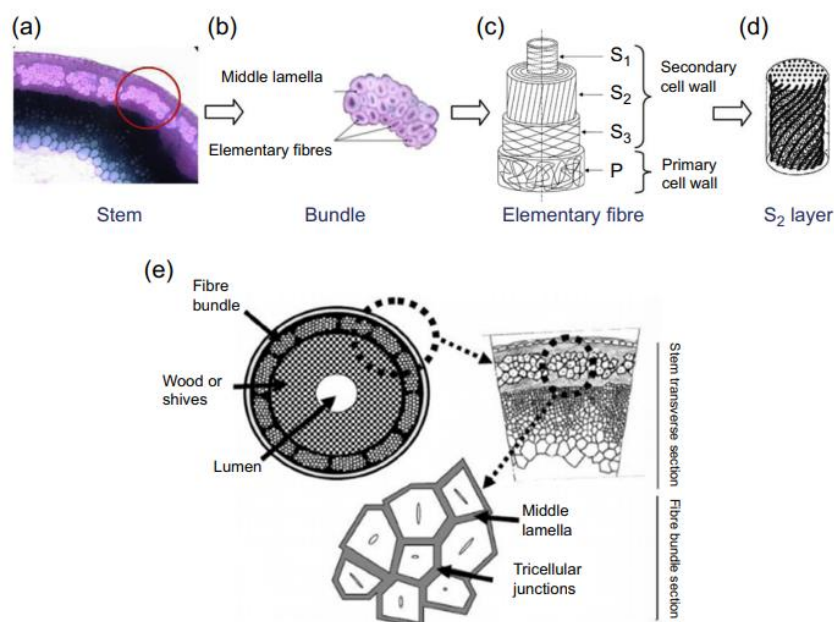


Obr. 3.6 Chemické složení molekuly celulózy, hemicelulózy a ligninu [77].

Celulóza je polysacharid tvořený z beta D-glukózy, jednotlivé glukózové skupiny jsou spojeny vazbou a tvoří dlouhé nerozvětvené řetězce, které jsou zcela nerozpustné ve vodě. Obvykle

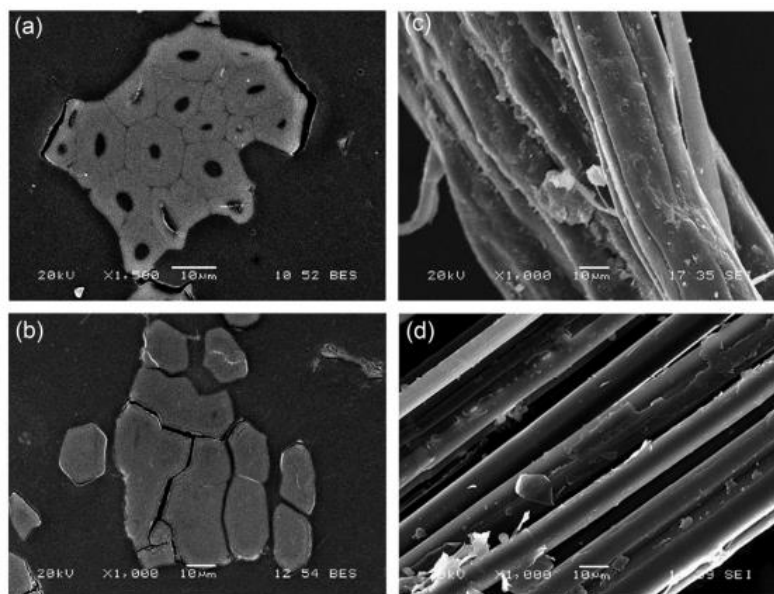
jedna molekula celulózy obsahuje několik tisíc glukózových skupin. Jednou z nevýhod tohoto uspořádání a vláken obsahujících celulózu je velké množství prázdných míst v řetězci, která vedou ke snadné absorpci vody jak při ponoření, tak ve vzdušné vlhkosti. Celulóza je také nejrozšířenějším biopolymerem, který na zemském povrchu ročně vzniká a je to také látka nejvíce obsažena v rostlinách [78]. Hemicelulóza je také polysacharid, ale na rozdíl od celulózy jej tvoří pouze krátké řetězce, může být tvořena více druhy glukózových jader. Její vlastnosti je nižší relativní molekulární hmotnost. Lignin (pochází z latinského slova dřevo) je látka, která zajišťuje rostlinám tuhost, zajišťující stabilitu rostliny. Jedná se o třírozměrný vysoce komplexní polymer s amorfni strukturou a vysokou molekulární hmotností. Lignin má oproti celulóze malou afinitu k vodě a způsobuje malou nasákavost. Zajímavou vlastností ligninu jsou jeho termoplastické vlastnosti, kdy při 90 °C začne měknout a při 170 °C začne tát [79]. Kombinací v buněčných stěnách vznikají lignocelulózová vlákna nejvhodnější pro využití v kompozitech.

Z morfologického hlediska vlastnosti vlákna ovlivňují jak složení anatomie, ale i velikost jednotlivých vláken a složení vrstev a buněčných celků. Právě buňky hrají velkou roli v budování vláken u rostlin, zejména u dřevin mohou být buňky 50 až 100 delší než širší. Správný poměr délky k šířce má významný vliv u celulózových základů, například konopí má poměr až 1000. Typická vlákna jsou charakterizována různými vrstvami, pokud obsahují dutinu, ta se nazývá lumen. Vrstvy jsou značeny S, S1 až S2. Svazek buněk, který tvoří vlákno, se nazývá fibril. Naproti tomu vnější vrstva je hrubá strukturovaná, a to lze dobře využít pro kompozity pro lepší adhezi k matrici. Detailněji je struktura typického lněného vlákna popsána na obr. 3.7 [80].



Obr. 3.7 Len – lýko a jeho složení a) řez stonkem, b) složení fibrilu, c) Elementární vlákno s vrstvami, d) výřez vrstvy S2, e) schématický řez stonkem [80].

Primární vrstva je chráněna sekundární, vlákna jednotlivých vrstev jsou rovnoběžná a spirálově stáčeji a jejich směr se s každou vrstvou mění a tím vytváří kompaktní strukturu. Sekundární vrstva je tvořena celulárními mikro fibrilami, jejich obal je tvořen ligninem, který druhou vrstvu tvoří mnohem více odolnou vůči nasákavosti a ohybu než primární vrstvu [81]. Rozdíl v uspořádání a morfologii vláken juty a lnu je vidět na obr. 3.8, rozdíly v mechanických vlastnostech pak v Tabulce 3.2.



Obr. 3.8 SEM záznam vláken a) juta řez, b) len řez, c) juta svazek vláken, d) len svazek vláken.

Tab. 3.2 Mechanické vlastnosti nejvýznamnějších vláken [82].

Vlákná	Hustota [g/cm ³]	Pevnost v tahu [GPa]	Modul Pružnosti E [GPa]	Mezní prodloužení při přetržení [%]
Celulózová vlákna Greenline	1,50	0,675	35,0	6,2
Juta (Jute)	1,30–1,50	0,183–0,773	30,0–55,0	1,4–3,1
Konopí (Hemp)	1,40–1,50	0,580–0,773	30,0–55,0	1,3–4,7
Sisal	1,33	0,507–0,855	9,0–28,0	2–3
Len (Flax)	1,53	0,800–1,795	40,0–85,0	1,1–1,5
Kenaf	1,45	0,330–0,930	22,0–53,0	3,7–6,9
Kokosové ořechy	0,07–1,00	0,106–0,270	37,0	30–40
Ramie	1,50	0,400–0,838	60,0–128,0	1,2–3,8
Bavlna	1,50–1,60	0,287–0,597	5,5–12,8	3,0–10,0
Kopřiva	2,11	1,590	87,0	2,1
Bambus	1,50	0,300–0,340	16,2	23,8

Důležité vlastnosti morfologie vlákna, aby bylo vhodné pro kompozitní výztuž:

- poměr délky k šířce buněk,
- procento celulózy k ligninu a dalším sloučeninám,
- výšky povrchových vad,
- výskyt strukturálních vad („kink bundles“),
- nasákavost vody,
- rozptyl velikosti jednotlivých vláken,
- zarovnání vláken ve svazku,
- výrobní-kultivační proces.

V případě testování jednotlivých vláken se používají metody [83]:

- test fragmentace jednotlivých vláken (Single fibre fragmentation test),
- zkouška vytažení jednoho vlákna (Single fibre pull-out test),
- zkouška mikro spojů (Micro-bond test).

3.2 Úprava vláken

Díky všem vlastnostem popsaným výše vykazují přírodní vlákna nízkou adhezi ke standardně používaným pryskyřicím, to může způsobit řadu jevů od zvýšené porozity k neprosycení nebo delaminaci jednotlivých vrstev nebo i vláken ve svazcích. Z toho důvodu je nutné vlákna upravovat různými metodami pro zvýšení adheze. Použití těchto povrchových úprav odlišuje použitelnost běžných vláken na vlákna použitelná pro kompozity a uživatel by měl u výrobce vláken ověřit vhodnost pro použitý systém matrice. S problémem je možné se setkat jak u termoplastických, tak u termosetových matricí [83].

Hlavní používané úpravy jsou fyzikální:

- UV záření,
- gama radiace,
- korona- plasma úprava.

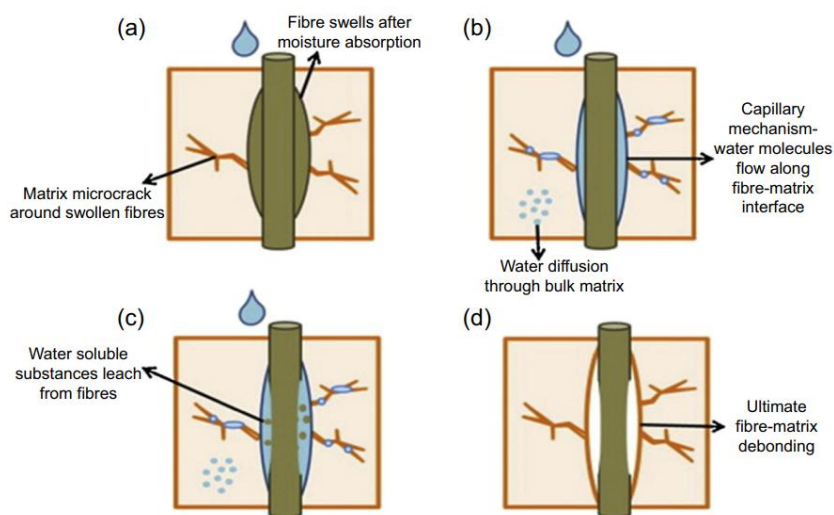
Tyto úpravy mají za cíl nejčastěji měnit povrchová napětí pomocí vlivem změny interakce povrchových iontů, nebo narušením celulózových vazeb [84].

Chemické úpravy se soustředí na louhování a aplikaci chemických látek, které se naváží na povrch a vytvoří nové vazby, nebo jej poruší a zlepší adhezi matrice k vláknům. Nejčastěji je využita úprava zásaditými látkami – vodní roztok NaOH nejdůležitějším aspektem je narušení vodíkové vazby ve struktuře sítě celulózy. Během úpravy se citlivý hydroxyl skupiny (OH) a reagují tak s vodou (H-OH). Přičemž ionizované reaktivní molekuly tvoří s NaOH alkoxid. Výsledkem je, že hydrofilní skupiny OH jsou redukovány a je zvýšena drsnost povrchu. S redukcí jsou také spojeny další jevy zlepšující vlastnosti adheze matrice [83]. Další z možných úprav jsou acetylace, úprava pomocí benzoylovými skupinami, využití peroxidů a silanů [83].

V posledních letech se objevují i úpravy pomocí přírodních látek, mezi ně patří biocidy a řízená aplikace bakterií [85] [86].

Jak již bylo uvedeno, jednou z nejvíce limitujících vlastností kompozitů z přírodních vláken je jejich nasákavost. Hlavním problémem nasákavosti je oslabení rozhraní mezi vlákny a matricí, snižuje se schopnost přenosu zatížení z matrice na výztužná vlákna a celkové mechanické vlastnosti se výrazně zhoršují. Podle Dhakala [87] dochází k absorpci vody podél rozhraní mezi vlákny a matricí, což může vést k bobtnání vláken, nebo k hydrolytickému rozpadu vláken. Standardní test nasákavosti probíhá v místnosti s řízenou vlhkostí za pokojové teploty, nebo ponořením do vody a následným měřením hmotnosti. Celý proces je popsán na obr. 3.9. Proces

degradace probíhá, když při bobtnání celulózových vláken vzniká napětí v oblastech rozhraní, což vede k mechanismu mikrotrhlin v matrici kolem bobtnajících vláken, a to podporuje kapilaritu a transport vlhkosti mikrotrhlinami. Volná voda se snižuje a vázaná voda se zvyšuje, protože voda je nadměrně absorbována. Látky rozpustné ve vodě se začnou z vláken vyplavovat a nakonec vedou ke konečné delaminaci mezi vláknem a matricí, jak bylo popsáno u kompozitů z nenasyčeného polyesteru vyztuženého konopnými vlákny (konopí/UPE) [87]. Delaminace mezi vláknem a matricí je iniciována vznikem osmotických tlakových kapes na povrchu vláken v důsledku vyluhování rozpuštěných látek rozpustných ve vodě [88]. Po delší době dochází k biologickým aktivitám, např. jako je růst hub, degradují přírodní vlákna.



Obr. 3.9 Princip narušení kompozitu pomocí vlhkosti [89].

Pro zabránění navlhání jsou dva přístupy, v prvním jsou ošetřena samotná vlákna [90], nebo je využito tradičního lakování celého testovaného dílu [91], tomuto tématu se ovšem mnoho vědeckých prací nezabývá, jedním z důvodů je malé rozšíření strukturálních dílů pro praktické využití. Pokud jsou tyto díly využity, firmy aplikují postupy, které jsou prověřené ze standardních skelných, nebo uhlíkových kompozitů. Tomuto tématu se částečně věnuje i tato práce.

Hybridizace obecně zlepšuje vlastnosti vyztužených kompozitů použitím více než jedné výztuže se stejnou matricí [92]. Atmakuri et al. [93] analyzovali mechanické vlastnosti a smáčivost hybridních kompozitů a zjistili, že hybridní kompozity vykazují lepší mechanické vlastnosti - zejména vyšší ohybové vlastnosti - než čisté lněné kompozity. Bolcu et al [94] tato zjištění potvrdili při studiu mechanických vlastností kompozitů s hybridními matricemi na bázi dammaru. Zaznamenali také výhodné tlumení vibrací analyzovaných kompozitů. Jak již bylo zmíněno je zásadní chování kompozitů při absorpci vlhkosti, které může snížit tuhost kompozitu, způsobit zesíťování matrice nebo delaminaci. Toto chování je obecně příznivější pro hybridní kompozity než pro kompozity vyztužené lněnými vlákny [95]. Schopnost hybridních kompozitů vyztužených uhlíkem a lnem zlepšit tlumicí vlastnosti vozidel otevírá nové možnosti v automobilovém, lodním a obecně automobilovém inženýrství. Fairlie a Njuguna [96] zjistili, že přidání vnější lněné vrstvy může zvýšit tlumicí poměr kompozitu o více než 50 %, zatímco přidání dvou vrstev přináší zvýšení o více než 90 %. Mahmoudi et al. [97] však zdokumentovali, že tlumicí vlastnosti souvisejí s orientací vláken. Z přírodních vláken lze použít také prepregové textilie z lněných vláken, které se vyznačují lepšími mechanickými vlastnostmi, Phillips [98]. Phillips uvádí jako zásadní zjištění, že výskyt pórovitosti v materiálu je zásadně ovlivněn způsobem výroby a zkompaktnění tlakem, tento má

také vliv na nasákání vlhkosti. Zbytková vlhkost velmi ovlivňuje vznik pórů, více než u skelných, nebo uhlíkových kompozitů. Dalším vlivem, který studuje je tvar tkaniny, kdy při velké velikosti rovingu dochází k velkým ohybům ve tkanině, které mají za následek celkové snížení mechanických vlastností laminátu. K stejným závěrům dospěli i studie Corbina [99], který srovnává vliv velikosti osnovy u útku na mechanické vlastnosti kompozitu, zejména na prodloužení a ohybovou pevnost. Aliho [100] se věnuje porovnání tahových a ohybových vlastností pro tkaninu a UD laminát o různém počtu vláken v osnově.

3.3 Výrobní technologie kompozitů s přírodními vlákny

Pro kompozity vyztužené bio vlákny existuje řada použitelných výrobních postupů. Výběr výrobní technologie je závislý na řadě faktorů, jako je velikost výrobní dávky, velikost a tvar dílu, materiál matrice a výztuže, požadavek na teplotní odolnost a mnoho dalších. Výrobní technologie také do jisté míry určuje mechanické vlastnosti laminátu. Z hlediska použití bio kompozitu je velmi důležité monitorovat celý proces výroby pro dané parametry a jejich dodržení. Chyby ovlivňují zásadně vlastnosti, zejména pórovitost a pevnost. Tyto specifika je třeba brát v úvahu již při samotném návrhu dílu. Dalším důležitým aspektem je možný rozptyl vlastností KPV, který je dán již jejich podstatou, tj. rostlinná báze, kdy vlastnosti jednotlivých výrobních dávek i vláken se mohou měnit jak z geografického hlediska, tak dobou pěstování a klimatem růstu rostliny atd. Tyto vlastnosti přispívají i k malému průmyslovému využití KPV pro pevnostní aplikace. Pokud se aplikuje vhodná technologie, jsou ale tyto vlastnosti eliminovány a aspekty, jako jsou recyklovatelnost, nízké náklady na výrobu vláken a environmentální dopad převažují. KPV díky jejich struktuře vlákna lze zpracovávat ve formě krátkých vláken vhodných k plnění základních polymerních termoplastických i termosetových matric. Zde se nejčastěji setkáváme se vstřikováním do forem. Výhodou je procesní čas a rychlý cyklus výroby součástí, který je ale limitován velikostí a objemovým podílem vláken [101]. Formování do otevřených forem je typické pro střední a velké díly, využívány jsou tkaniny a jednosměrný výztuže spolu s matricí. Z těchto metod jsou nejvyužívanější pro bio kompozity ruční kladení, vakuová konsolidace, vakuová infuze pryskyřice, metody RTM, zpracování prepregů v autoklávu, zpracování prepregu -out of autoclave a lisování. Z modernějších metod se lze také setkat s automatickým kladením vláken AFP, ATL a 3D tiskem. Možností a metod a jejich popis najdeme mnohem více v [14].

Ruční kladení je nejméně vhodnou technikou pro výrobu, ale také nejjednodušší a nejrozšířenější. Při této metodě dojde k ručnímu nasycení tkaniny pryskyřicí. Metod sycení může být více, v závěru je úspěch a kvalita kompozitu závislá na zručnosti uživatele a přítlaku, kterým ručně díl přitlačí a tím konsoliduje jednotlivé vrstvy. Při tomto procesu se nejčastěji využívá válečků a štětců. Dochází zde k problémům, nestejnomyšlnému zatížení a možnosti vzniku mnoha dutin a pórovitosti [102]. Dalším problémem je také nekonstantní objemový podíl pryskyřice a vlákna [103]. Vylepšení metody je dodatečné vakuování dílu, které zajistí konstantní tlak na celý povrch dílu. Důsledkem působení vakua je díl stlačen, vrstvy jsou zkompatněny, vytlačeny vzduchové kapsy - potencionální póry a přebytečná pryskyřice může být dle skladby nasáta do dalších technických vrstev. Hlavní limitací je zde zručnost operátora při aplikaci vakuovací fólie. Kdy nesmí dojít k tvorbě tzv. mostů – oblastí kde fólie nepřilne k povrchu, nejčastěji vnitřní konvexní rádiusy. Tyto jsou poté vyplněny pryskyřicí. Další z častých chyb je netěsnost fólie a pronikání vzduchu, vedoucí ke zvýšené pórovitosti mezi místem odsávaným a netěsností – porovitost je v místech difference tlaku. V případě velkých dílů je také třeba volit pryskyřice s dlouhou dobou gelace k omezení exotermické reakce, a také k zajištění dostatečně dlouhého času pro obsluhu, k aplikaci materiálů a vakua před gelováním pryskyřice.

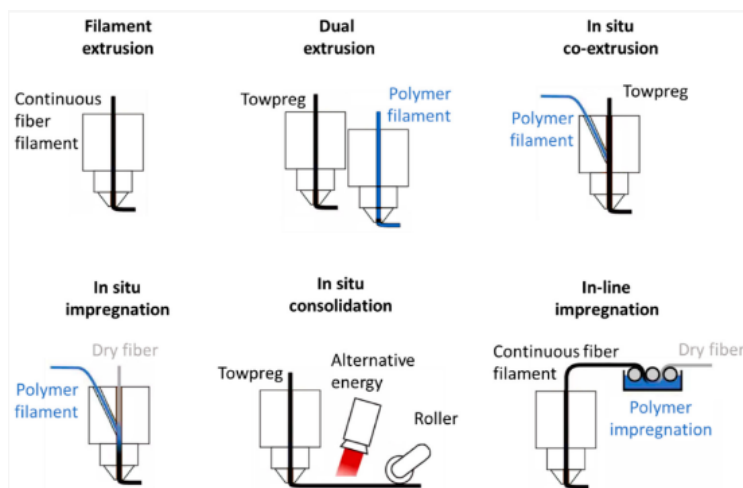
Jednou z nejvíce využívaných metod pro kvalitní díly a nízké pořizovací nároky jsou metody vakuové infuze [104]. Dalšími technologiemi s pozitivním vlivem na mechanické vlastnosti

kompozitů vyztužených přírodními vlákny jsou Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding (VATRM) a Seemann Composite Resin Infusion Moulding Process (SCRIMP). Zejména technologie VATRM se v posledních letech stala velmi populární díky své vysoké produktivitě a nízkým provozním nákladům. VATRM však může při netěsnosti přinášet vady, jako jsou mikro póry, které zhoršují kvalitu a mechanické vlastnosti vyráběných kompozitních dílů [105]. Při přechodu do sériové produkce je třeba se zaměřit na metody RTM - Resin transfer moulding, které jsou výhodné z hlediska kvality dílů, obsahu pórovitosti a využití různých druhů tkaných i netkaných materiálů, jejich nevýhodou je ale nízký poměr vláken k matrici. Při zvyšujícím se tlaku vstříkované pryskyřice, lze docílit i lepších poměrů vlákna u pryskyřice a kratších operačních časů, ale zvyšují se nároky na formy a vstříkovací zařízení. [106], [101]. Metodou určenou pro industriální využití je lisování, zde jsou nutné vysoké vstupní náklady na zařízení a formu, stejně jako pro samotný proces, kdy nejdříve je vyroben preform, který je dále zpracováván v lisu. Matrice je buď vstříknuta v procesu lisování, nebo je preform předimpregnován ve formě prepreg, SMC, BMC polotovaru. V případě automatizované výrobní linky může dojít i k sycení tkaniny před založením do lisu. [107], [108]. Metoda je přesná a díky aplikovanému tlaku lze dosáhnout vysoké kvality dílů.

Výroba v autoklávu je jednou z nejpreciznějších metod dosahující nejlepších výsledků. Vstupní materiál je ve formě prepregu, což je předsycená tkanina přesným množstvím pryskyřice. Dílec je dále vložen do formy a jsou aplikovány další procesní vrstvy pro aplikaci vakua, kdy dojde k přitlačení dílu na formu a konsolidaci vrstev. Takto je díl přemístěn do autoklávu kde při zvýšené teplotě a tlaku dojde k vytvrzení pryskyřice. Velikosti tlaku, teplot a času je závislá na typu pryskyřice. Při využití u přírodních vláken je velkou výhodou aplikovaný, který je uniformní na celý povrch, ten vede k minimalizaci pórovitosti v kompozitu jak pro póry uzavřené v laminátu, tak pro póry vytvořené během procesu na základě chemických reakcí za vzniků plyných složek, nebo na základě uvolňování vlhkosti z přírodního materiálu. V procesu je díl stále odsáván pomocí vývěvy, nebo je díl ventilován do atmosféry mimo autokláv [109].

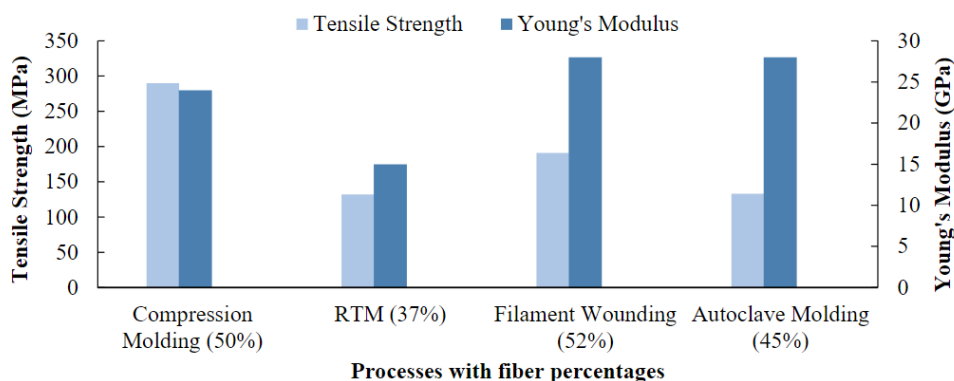
Z dalších metod vhodných pro sériovou výrobu, jen určitého tvarového typu součástí to jsou navíjení, oplétání, kdy jsou jednotlivé rovingy, nebo pásy kladeny na mandrelu a poté zkonsolidovány a vytvrzeny, je využit prepreg, nebo mokré sycení těsně před navinutím. Součásti ve tvaru tyčí nebo profilů jsou velmi dobrých kvalit, co se týká poměru vláken a pryskyřice, tak obsahu pórů [110], [111]. Obdobně tvarově omezené jsou metody automatického kladení AFP, ATL [112].

Specifickou oblastí výroby je 3D tisk kompozitů. Z hlediska použitých vláken a materiálů se lze setkat se širokou škálou. Matrice jsou využívány jak termosetové (pryskyřice), tak termoplastické (materiály typu PA, PLA, PEEK, PEI, PC, atd). Vlákna lze použít různých délek, od mikro vláken určených pro plnění plastové matrice pro tiskárny typu FDM/FFF (fused deposition modeling/ fused filament fabrication) [113], [114], až po kontinuální výtzuže kladené metodu CFP (continous filamanet placement). U dlouho-vláknových výtzuží a velkých zařízení se již technologie 3D tisku prolíná s metodami AFP/ATL [115]. Hlavní nevýhodou dílů vyrobených 3D tiskem jak pro krátká vlákna, tak pro kontinuální je špatné prosycení matrice, vysoká pórovitost a s tím související snížení mechanické pevnosti dílců. Nejvýznamnější metody sycení kontinuálního vlákna jsou uvedeny na obr. 3.10.

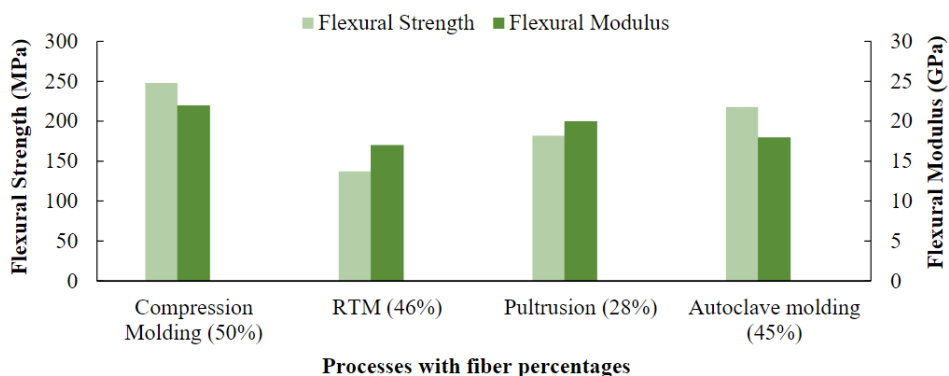


Obr. 3.10 Metody syčení kontinuálního vlákna při 3D tisku [116].

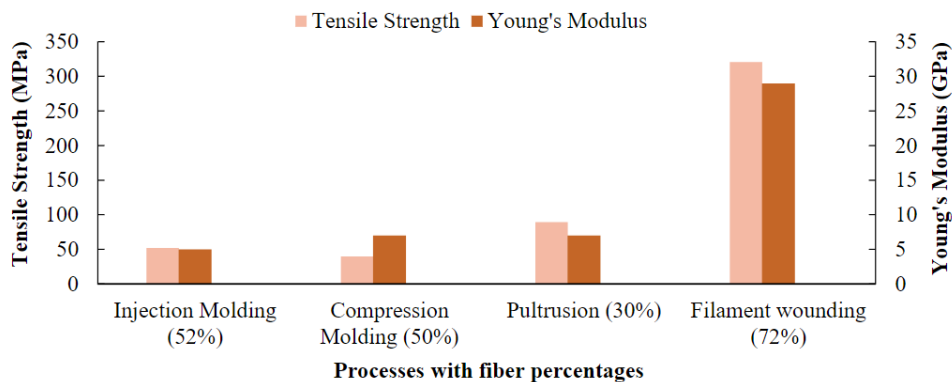
Výše uvedené technologie je třeba volit vždy po zvážení mnoha okolností výroby. U kompozitů s přírodními vlákny hrají i velkou roli změny mechanických vlastností. Vliv jednotlivých technologií na mechanické vlastnosti lněného kompozitu s epoxidovou matricí se věnuje Billah [103], ve své práci uvádí následující závislosti obr. 3.11-3.13. Obdobně se technologiím věnuje Abdurohman [117], který dochází ke stejným závěrům u skleného laminátu.



Obr. 3.11 porovnání pevnosti v tahu, modul s výrobní technologií, pro composit len-epoxid [103].



Obr. 3.12 Porovnání pevnosti v ohybu, modul s výrobní technologií, pro composit len-epoxid [103].



Obr. 3.13 Porovnání pevnosti v tahu, modul s výrobní technologií, pro composit len-polypropylen [103].

3.4 Testování mechanických vlastností kompozitních materiálů

Kompozity s přírodními vlákny je nutné testovat nejen pro mechanické vlastnosti, jako jsou pevnost v tahu, ohybu smyku atd., ale je třeba provést i zkoušky odolnosti vůči prostředí, zejména vlhkosti a UV záření. Zkoušení a hodnocení vlastností vláken i matrice podle široké škály kritérií je pro výrobce důležité, pro výběr nejvhodnější kombinace výztuže a matrice pro jejich konečné kompozitní výrobky. AL-Oqla et al [118] zdůraznili význam kombinace ekonomického, environmentálního a technického hlediska pro dosažení lepších vlastností kompozitů. Z hlediska použité lze zvolit celou škálu testovacích metod, které nejčastěji řeší normy ISO EN, nebo ASTM. Normy uvádějí případ umístění kompozitu zejména pro oblasti dopravy, letectví a obecného testování. Pro každou oblast je možné nalézt jiný soubor testů a požadovaných vlastností na kompozity. Testy obsažené v jednotlivých normách jsou podobné a zohledňují pouze specifika dané oblasti, mnohdy jsou shodné. V odborné literatuře se lze setkat jak s testy ISO EN, tak s ASTM. ASTM testovací metody vychází z požadavků pro letectví a jsou déle využívány i rozšířeny než ISO EN. V rámci ASTM se kompozity zabývá komise D30 [119]. Normy ISO EN obsahují zhruba 400 dílčích dokumentů zabývajících se výrobou, použitím a testováním kompozitních materiálů.

Často využívané normy z hlediska hodnocení mechanických vlastnosti kompozitů jsou následující [120], [22] (uvedeno originální znění normy):

a) Vlákna a rovingy:

- ASTM D 3379: Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus for High-Modulus Single-Filament Materials,
- ASTM D 4018: Standard Test Methods for Properties of Continuous Filament Carbon and Graphite Fiber Tows.

b) Matrice:

- ASTM D 638: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics,
- ASTM D 695: Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics,
- ASTM E 143: Standard Test Method for Shear Modulus at Room Temperature.

c) Lamináty:

- ASTM D 3039: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials,

- ASTM D 3410: Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading,
 - ASTM D 790: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials,
 - ASTM D 3518: Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate,
 - ASTM D 5379: Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method,
 - ASTM D 2344: Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates.
- d) Sendvičové konstrukce:
- ASTM C 297: Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions,
 - ASTM C 364: Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions,
 - ASTM C 273: Standard Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials,
 - ASTM D 7249: Standard Test Method for Facesheet Properties of Sandwich Constructions by Long Beam Flexure.

V pracích zaměřených na KPV materiály se lze setkat zejména s tahovými a ohybovými (3-bodový ohyb) mechanickými zkouškami kompozitů. Tahové zkoušky dle ASTM D 3039 popsali v práci Mahboob [121], Benkhelladi [122], Dinesh [123], Sarkar [124]. Všechny práce zaznamenávají podobnou směrdatnou odchylku pro měření pevnosti v tahu a to v rozmezí 5–30 MPa. Absolutní hodnoty v pracích uvedené nelze porovnat z důvodu využití jiných matic i tkanin. Mahboob [121] ve své studii uvádí rozptyl pevnosti v tahu pro lnem vyztužený kompozit pro různé autory a různý objem vláken od 132 MPa do 408 MPa. Modul pružnosti v tahu je uváděn od 13 GPa do 40 GPa. Zkoušky ohybem jsou realizovány pomocí standardu ASTM D790 – tříbodovým ohybem. V mnoha pracích je tato metoda upravena pro danou tloušťku materiálu, jelikož se často vyskytují materiály, které jsou mimo rozsah standardní zkoušky, a je třeba upravit vzdálenost podpěr pro ohyb. Zkoušku využívá Dinesh [123], Prasad [102], Bachmann [125], Benkhelladi [122], u této zkoušky platí podobné rozptyly jako u zkoušek tahových jak pro pevnost v tahu, tak modul pružnosti v ohybu. Pro hodnocení bio-kompozitů se lze také setkat s hodnocením na smyk [126], [127]. Kompresní zkoušky nejsou zcela rozšířené, příkladem je práce Mahbooba et al. [121], kde je jasná korelace mezi poškozením kompozitu, směrem vláken a zatěžující křivkou, kdy je chování obdobné pro tahové i tlakové namáhání lněného kompozitu. V testech se lze setkat i s využitím metod DIC -digital image correlation, kdy je testovaný dílec snímán pomocí CCD kamery a deformace je vyhodnocována pomocí snímání obrazových bodů, nebo pixelových shluků při naneseném náhodném paternu. Tyto výsledky poskytují plošnou, případně prostorovou, hodnotu deformace v čase [128] [127] [129].

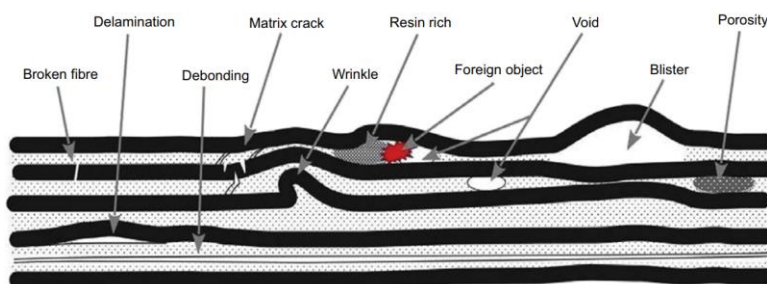
Co se týče mechanických zkoušek, tahem jednotlivých vláken, zkouška svazku suchých vláken, nebo zkouška svazku impregnovaných vláken (IFBT) [130], [131], tak metoda IFBT je také vhodná pro testování vlivu jednotlivých kroků extrakce a zušlechťování na tuhost a pevnost přírodních vláken v kompozitech [132]. Pro hlubší pochopení mechanického chování a způsobů poškození lze použít hodnocení akustické emise - případně v kombinaci s dalšími moderními metodami [133].

3.5 Vady a poškození kompozitů

KPV materiály díky svému základu a využití v náročných aplikacích je třeba studovat na přítomnost vad a poškození během celého cyklu testování a v případě aplikace reálných dílů v průběhu jejich životnosti. Nejčastěji se lze setkat s defekty již po výrobě, vycházející ze špatné výrobní technologie, nebo z nedodržení technologického postupu. K těmto defektům nejčastěji patří:

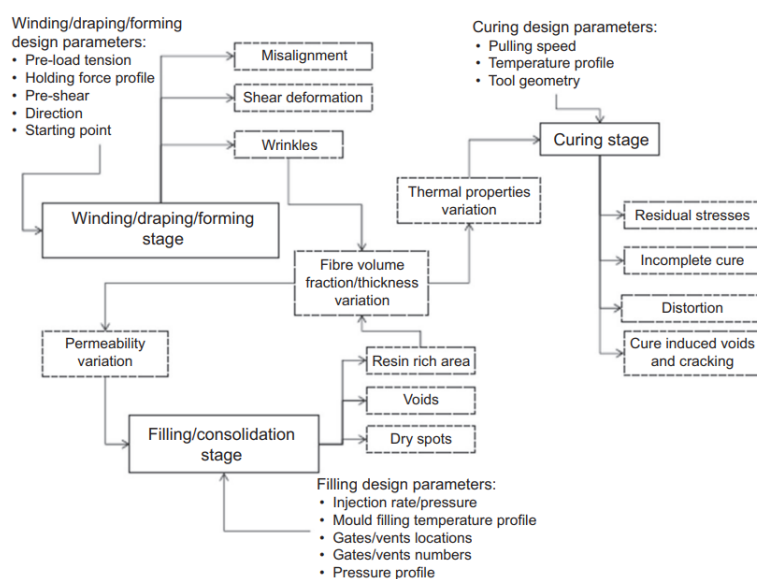
- delaminace - delamination,
- lom vláken – fibre crack,
- lom pryskyřice – matrix crack,
- rozlepení laminátu – debonding,
- ohyb vláken v laminátu – wrinkles,
- Oblasti s velkým množstvím pryskyřice – resin rich area,
- Dutiny – voids,
- Porozita – porosity,
- Neprosycené oblasti – dry spots.

Tyto defekty jsou znázorněny na obr. 3.14. Tyto jsou nejčastěji způsobeny, špatnou konsolidací materiálu, vlhkostí vstupního materiálu, teplotním namáháním, kontaminace materiálu atd. Knoeller [134].



Obr. 3.14 Výrobní defekty v kompozitu [135].

Jednotlivé výrobní chyby a jejich možnou příčinu vlivem technologie lze vidět na obr. 3.15.

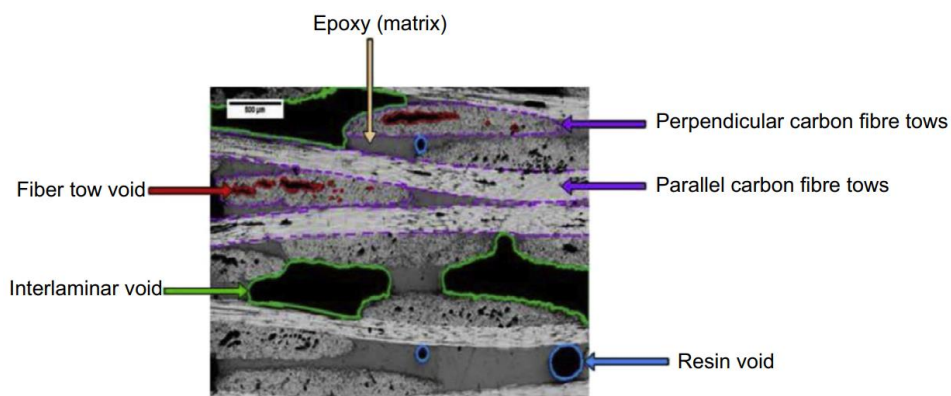


Obr. 3.15 Výrobní defekty a jejich závislost na technologických parametrech, převzato z [136].

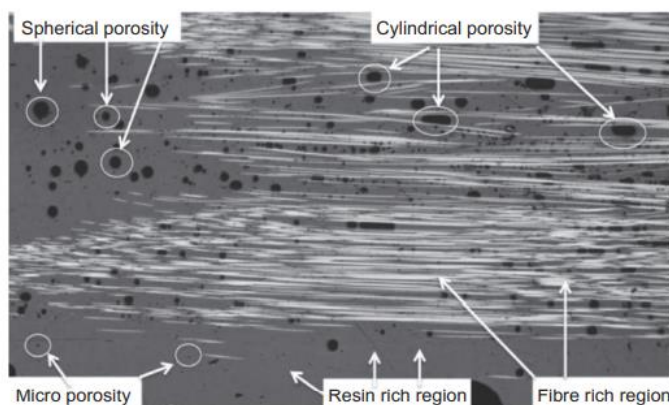
S prasklinami ve výztuži, nebo matrici je možné se nejčastěji setkat vlivem rozdílné teplotní roztažnosti matrice vs. výztuže. Koeficient teplotní roztažnosti je ve většině případů vyšší u matrice a ta způsobuje objemový tlak na vlákna. Záleží na materiálu a spořádání laminátu zda dojde k porušení, objemovému, nebo lokálnímu. Tento jev nastává nejčastěji při zpracování termoplastických kompozitů, autoklávovém zpracování prepregů a při využití lisování za vysokých teplot vytvrzování. Problém souvisí nejčastěji s rychlostí ochlazování, která by neměla přesáhnout $2^{\circ}\text{C min}^{-1}$ [137]. Vnitřní napětí laminátu může být také způsobeno nerovnoměrným teplotním polem na dílu a mezi jednotlivými vrstvami, kdy vytvrzení horních vrstev probíhá rychleji než vrstev na formě, které jsou prohřívány pomaleji. Pokud dané vnitřní napětí překročí mez kluzu matrice, může dojít až k delaminaci jednotlivých vrstev, nebo pouze k lokálním porušením ve formě mikrotrhlin [138], [139]. Největší koncentrace napětí nastává většinou mezi jednotlivými vrstvami laminátu. V případě, že se v objemu naindukují velké množství mikrotrhlin a jejich celková energie přesáhne danou mez únosnosti materiálu proti šíření trhlin, dojde ke vzniku makrotrhliny, která je již opticky viditelná a může obsáhnout několik vrstev [140]. Dalším z vlivů, který může přispět k tvorbě defektů a trhlin je zbytková vlhkost, která je uzavřena v materiálu výztuže, jedná se o problém zejména KPV při výrobních technologiích, kdy je materiál zahřát a vlhkost se uvolňuje a může působit pórovitost, nebo až delaminaci celých vrstev.

3.5.1 Pórovitost

Pórovitost, jak již bylo zmíněno výše, je jedním ze stěžejních problémů při výrobě kompozitu. Nejčastěji je možné se setkat s její popisem, jako procentuální podíl v laminátu. Další podíly tvoří matrice a výztuž. Rozeznat lze několik typů pórovitosti (porosity) a dutin (voids), které jsou vyplněny zachyceným vzduchem, nebo plynnými látkami vznikajícími při výrobě. K zachycení dutin nastává nejčastěji při míchání pryskyřice, kde se jedná o bubliny, které jsou díky nedostatečnému tlaku, nebo vysoké viskozitě uzavřeny v pryskyřici ve chvíli kdy dochází ke gelovatění, poté jsou vytvrzeny v laminátu. Další z příčin souvisí s nedostatečnou smáčivostí vláken, kde díky nedostatečnému tlaku a dalším technologickým parametrům je uzavřena vzduchová kapsa. Tento jev také souvisí s nedostatečným stlačením jednotlivých vrstev kompozity. S pórovitostí se také setkáváme v případě přítomnosti vlhkosti jak v materiálu, tak v prostředí, tato při zvýšené teplotě, nebo za působení chemické reakce s matricí také způsobuje vznik pórovitosti, zejména u prepregů v autoklávě a lisování. Výskyt pórovitosti je jak na povrchu laminátu, tak v matrici a na rozhraní vlákno matrice. Laminát s dutinami a jejich popis je zobrazen na obrázku 3.16 [141]. Jsou zde zobrazeny velikosti dutin, při kterých již kompozit selhává. Běžněji se lze setkat s výskytem pórovitosti zobrazeným na obr. 3.17. Kde je zobrazena porozita jak z hlediska geometrického, tak výskyt uvnitř oblastí bohatých na pryskyřici, nebo vlákno [142]. Velké dutiny, které jsou uzavřeny mezi vrstvami lze omezit pomocí mezioperačních kroků, kdy se díl pomocí vakua z kompaktní (debunking) tento postup je doporučován při využití před-impregnovaných materiálů po každé páté vrstvě, ovšem záleží na gramáži tkaniny a vlastnostech matrice.



Obr. 3.16 Různé typy pórovitosti v laminátu [141].



Obr. 3.17 Porosita v laminátu, příčný řez, zobrazené rozdíly velikosti, tvaru a umístění [142].

Pórovitost a dutinu v materiálu lze určit ze vztahu, který definoval Fernlund [141]. Ten předpokládá, že uzavřený plyn se chová dle Darcioho obecného zákona za předpokladu ideálního plynu dle rovnice (3.1)

$$\phi \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{K}{\mu} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(p \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 0 \quad (3.1)$$

Kde ϕ je porozita, p (Pa) tlak, t (s) čas, K je permeabilita – prostupnost plynu (m^2), μ dynamickou viskozitu plynu (Pa.s) a x (m) je vzdálenost. Tento vztah je možné převést do tvaru:

$$t^* = \frac{\mu}{p_0} \frac{\phi}{K} \left[-\frac{1}{0,9} \ln \left(\frac{\phi_F}{\phi} - \frac{p_v}{p_0} \right) \right]^{\frac{1}{0,6}} L^2 \quad (3.2)$$

Kde t^* je minimální požadovaný čas odvakuování, p_0 je počáteční tlak, ϕ_F je požadovaný stupeň pórovitosti, p_v je aplikovaný tlak a L je délka. Z rovnice je patrné, že velikost daného dílu je pro čas strávený vakuováním zásadní. Rozdílu tlaku jsou většinou dané vlastnostmi vývěvy. Permeabilitu prostředí je vždy nutné ověřit experimentálně, zejména u přírodních vláken, které jsou svou strukturou nahodilé.

Rovnice 3.2 uvedená výše platí pro ideální materiály, jako jsou průmyslově vyráběná vlákna skelná, uhlíková a další, u přírodních vláken se situace mění již díky jejich složení. Každé vlákno se skládá z vrstev a obsahuje středovou dutou část lumen, který sám o sobě tvoří porozitu v materiálu, díky úpravám a přirozeným hydrofobním vlastnostem vláken nelze výskyt

pórovitosti zamezit. Madsen [143] se ve své práci zabývá určením váhového pravidla pro přírodní materiály za přítomnosti porozity. Pro výpočet a korekci standardního váhového pravidla je zahrnut objemový podíl pórovitosti v_p . Modul pružnosti přímo úměrný:

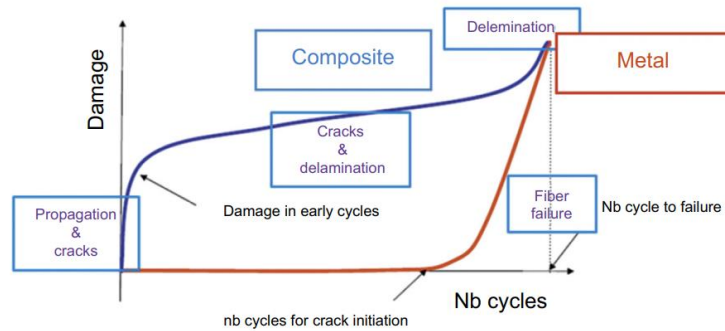
$$E_c = (\eta_0 \eta_1 V_f E_f + V_m E_m)(1 - V_p)^n \quad (3.3)$$

Kde η_0 konstanta orientace vláken η_1 konstanta délky vláken, V_p objemový podíl porozity a n je exponent účinku porosity. Tento vztah dobře koreluje i přírodní materiály, ale jeho nedostatkem je nutná experimentální zjištění koeficientu n pro každou kombinaci výztuže a matrice i v závislosti na technologii. Koeficient n určuje míru napětí indukovaného v kompozitu vlivem pórovitosti. Pokud $n = 0$, tak je pórovitost zcela zanedbána. Pro většinu přírodních vláken lze přibližně využít hodnotu $n = 2$ [143]. Při hlubším zobecnění vztahu 3.3 lze definovat pro výztuž i matrici určitý podíl vlastní porozity definovaný konstatami α_{pf} a α_{pm} , které vyjadřují vlastní mikro porozitu vláken a matrice důležitou pro přírodní materiály. Vlastní mikroporozita vlákn lnu je uváděna od 2,7 % do 4 %, málokdy překračuje hodnotu 8 % [144]. Tento objem je dán nejen způsobem pěstování a odrůdou vláken, ale také technologickými parametry při výrobě kompozitu, při aplikaci velkých tlaků (od 6 Bar) lze pozorovat zploštění vláken a zmenšení podílu vnitřní porozity až na 0,1 % [145]. Z praktického hlediska lze předpokládat, že se zvyšujícím se objemovým podílem vláken se bude zvyšovat i porozita, Madsen et. Al uvádí, že při zvýšení váhového podílu z 0,56 na 0,72 se zvýší porozita z 0,04 na 0,08 (pro polypropylenovou matrici lněná vlákna) [146]. Obecně i pro přírodní materiály platí, že pórovitost v mezích 2-2,5 % je přijatelná z hlediska použití dílce. S každým 1% nárůstem pórovitosti pak klesá hodnota vnitřní smykové pevnosti o 7 % [147]. Dalším problémem zvýšené pórovitosti je vyšší tendence k absorpci vlhkosti, která vede ke snížení mechanických vlastností materiálu a dalšímu rozvoji poruch [148].

3.6 Charakteristika poškození kompozitních dílců a metody detekce

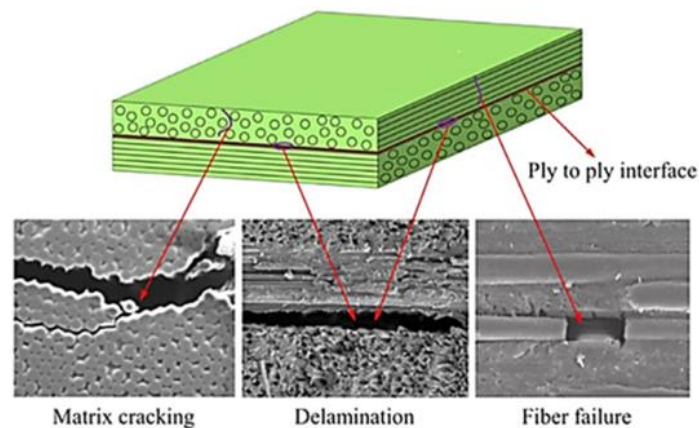
Poškození kompozitních materiálů během jejich provozu je nedílnou součástí jejich životního cyklu. K poškození dochází vlivem degradace materiálů za působením vnějších vlivů, jako je vlhkost – popsána výše, UV záření, vystavení chemické degradaci. K nejčastějším faktorům, ale patří poškození mechanické působením vnější sílu, nebo kontaktem s cizím tělesem – náraz cizího tělesa. Tyto vady je třeba diagnostikovat před fatálním selháním dílce. Z hlediska KPV je struktura vad dána zejména jejich využitím buď v prostředí – stavebních materiálů, strojních dílců, nebo izolačních materiálů. Poškození mohou být způsobeny i vlivem rozvoje výrobních vad, jako je delaminace, vnitřní napětí a mikrotrhliny.

Mnoho poruch rozvíjejících se u kompozitních materiálů souvisí s jejich zatěžováním a s únavovými vlastnostmi. Typický je tento jev pro trhliny a jejich šíření, které je rozdílné proti kovovým materiálům, které jsou velmi dobře zmapovány. Kompozity vykazují typicky nižší hodnoty únavy, kdy se až 50 % poruch projeví již v prvních 20 % životnosti. Závislost mezi počtem cyklů a poškozením pro kompozitní materiály a kovy je patrná z obr. 3.18. Jsou zde i popsány jednotlivé typy poškození typické pro rozvoj únavového zatěžování.



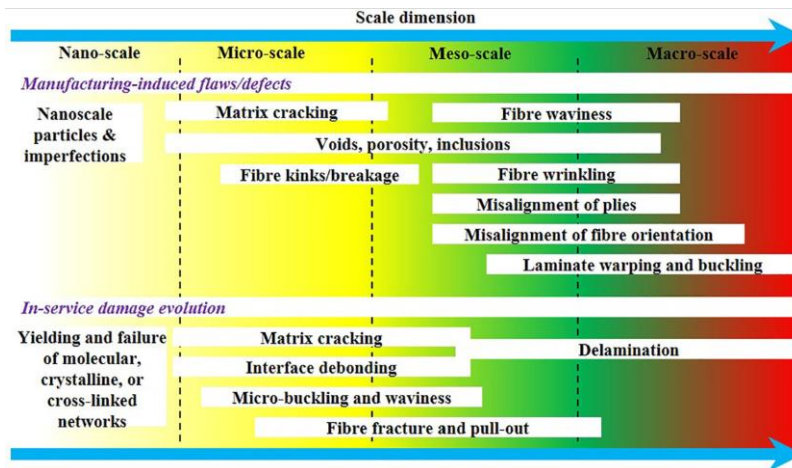
Obr. 3.18 Závislost mezi počtem cyklů a poškozením pro kompozitní materiály a kovy [149].

Kompozitní díly dokáží pracovat i s těmito poruchami dále díky své struktuře vláken a matrice [149]. Zjednodušeně lze říci že může dojít k poruchám matrice, oddělení vláken od matrice nebo lomu vláken, viz obr. 3.19. Tyto nastávají z důvodu tahového, tlakového, ohybového, smykového zatížení a jejich kombinací, nebo působením vnějších vlivů, jako je náraz, zásah blesku, únavové působení. V případě sendvičových konstrukcí je namáhání přenášeno i prostřednictvím jádra, kde působí další vlivy a nové módy porušení. Není stanovena pevná hranice mezi výrobním defektem a poškozením a mnohdy jsou úzce provázány.



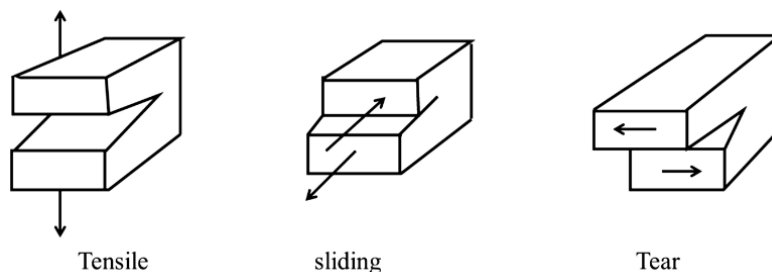
Obr. 3.19 Poruchy v kompozitech [150].

Na obr. 3.20 je uveden rozvoj jednotlivých poruch a vad v rámci jejich měřítka vzniku a ovlivnění struktury kompozitu [151]. Při vzniku trhlin v matrice se může napětí, například zbytkové, soustředit v určité oblasti a vytvořit vady nebo defekty, které později podporují šíření trhliny. Při odlepení vlákna od matrice v příčném směru, následuje porušení matrice, vytažení vláken a podélné porušení vláken. Dalšími jsou poškození tlakem a smykem. Mohou vést k delaminaci kompozitních materiálů. K porušení vláken, nebo jejich zlomu/roztřepení dochází při přetržení vláken v průchozím směru [149] [150] [152] [153].



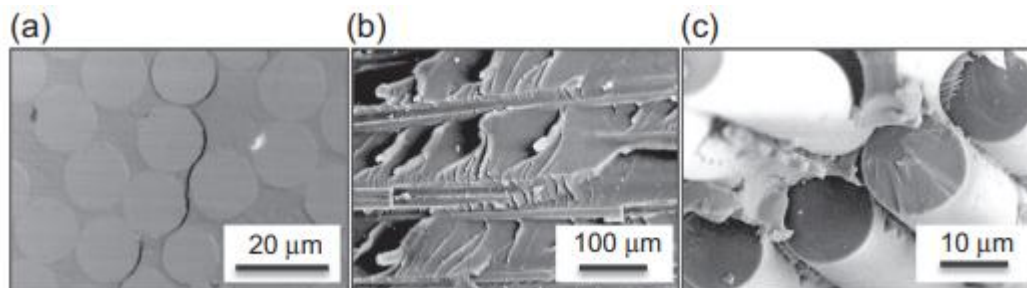
Obr. 3.20 Vady a poruchy v kompozitech vzhledem k jejich velikosti [151].

Dalším faktorem, který může přispívat k náchylnosti kompozitů k delaminaci, je křehkost pryskyřice matrice. K delaminaci může dojít mimo jiné v důsledku vzpěru a tlakového zatížení. Často k němu dochází v důsledku slabé mezifázové adheze vláken a matrice. Mezi způsoby delaminace patří způsoby I, II a III, které jsou způsobeny otevřením nebo odlupováním, posuvným smykem a roztržením, viz obr. 3.21. Mód I je spojován s delaminací a je ovlivněn zejména typem tkanin a matrice. Mód II je také formou delaminace rovnoběžnou s jednotlivými pláty tkaniny, zjednodušeně pláty kloužou po sobě, tento typ poškození se vyskytuje poměrně málo. V módu III, známém jako trhací režim, působí smykové napětí rovnoběžně s rovinou trhliny a rovnoběžně s čelem trhliny. Tento režim se také označuje jako režim smyku mimo rovinu stříhu.



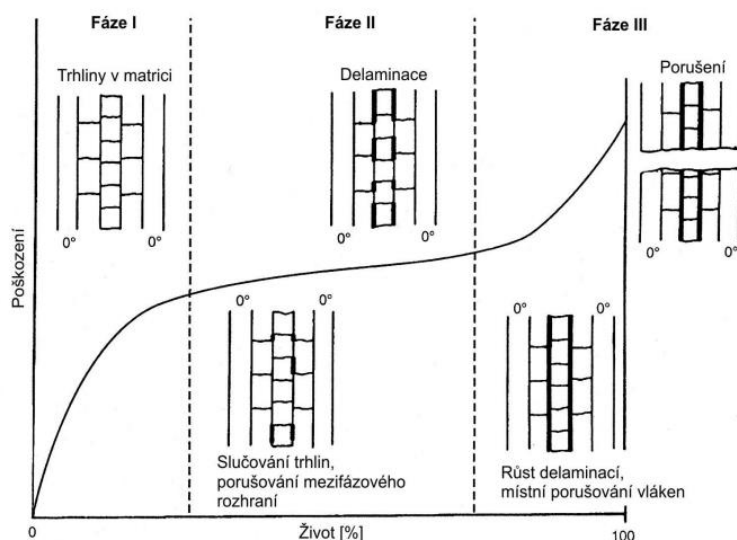
Obr. 3.21 Způsoby a směry vedoucí k delaminaci kompozitu [154].

Jednotlivým módům odpovídá i poškození uvedené na obr. 3.22.



Obr. 3.22 SEM snímky (a) interlaminární, (b) intralaminární, (c) translaminární, poškození v kompozitech FRP [149].

Kumulace poruch v čase a jejich soustředění je právě příčinou rozdílného únavového chování kompozitních materiálů vůči kovovým materiálům, v kompozitních materiálech nastává kumulace diskretních poruch. Typický projev lze rozdělit do tří fází, jež jsou popsány na obr. 3.23. V první fázi nastává rychlé vytváření poruch, jedná se i o nižší desítky cyklů, poruchy jsou nejčastěji typu trhlin v matrici, kdy se zejména vyrovnávají vnitřní pnutí a výrobní vady v materiálu. V další fázi nastává stabilizace a pomalejší nárůst vad ve formě slučování trhlin a mezifázového rozhraní. V této fázi také probíhá mechanismus přebírání zatížení v okolí poruch sousedními vlákny. Poté nastává oddělení vláken od matrice – debonding. Jakmile se již překročí určitá mez šíření trhlin, nastává delaminace a rychlé šíření makroskopických vad v materiálu až do porušení dílce na konci fáze III. Tento postup byl popsán a zdokumentován pro obecné kompozity zejména v [155] [156].



Obr. 3.23 Fáze poškozování vícesměnných kompozitů, namáhání tah – tah, podle Růžička [157].

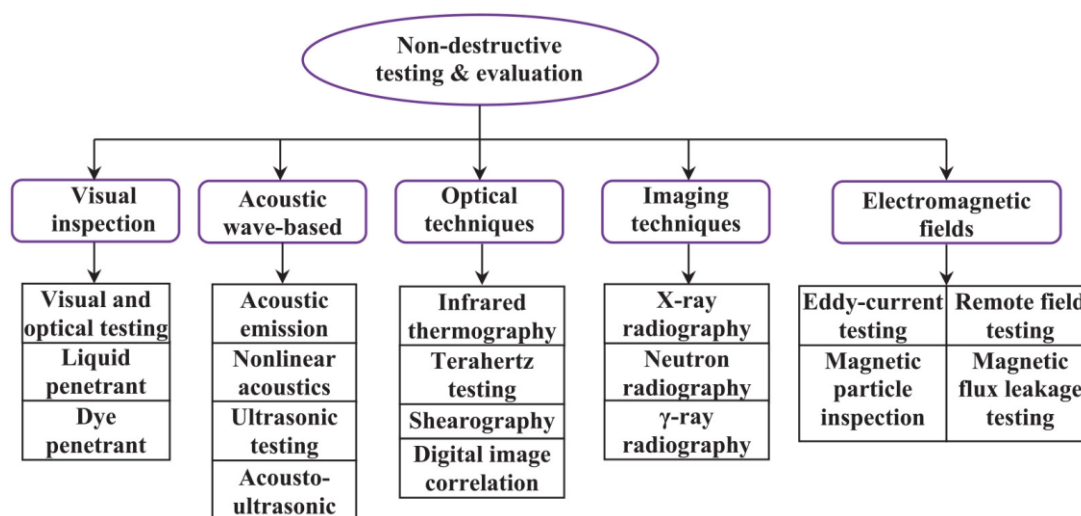
Otázkám únavy kompozitních materiálů se v ČR zabývají pracoviště ČVUT – prof. Růžička a další, ZČU v Plzni – prof. Laš a další, VZLU, VUT v Brně - doc. Klement a mnoho dalších.

V případě hodnocení kompozitů s přírodními vlákny je situace obdobná jako u kompozitů s vlákny synteticky vyrobenými s dílčími odlišnostmi. Jedním z faktorů je nízká pevnost samotných vláken proti matrici, kdy je působení vláken na únavu poměrně nízké a záleží značně na jejich poměru, pro termoplastickou matrici a krátká vlákna je tento efekt nejvyšší [158]. Přírodní materiály ovlivňují únavové vlastnosti také díky své vlastnosti vysokého útlumu. Díky této vlastnosti jsou určitá vlákna – např. lněná přenášet vyšší amplitudy zatížení [159]. Většina ale souvisí se zpracováním a nízkou smáčivostí a jejím ovlivněním, vysokou absorpcí vlhkosti, které vedou k nízké pevnosti na rozhraní vlákna a matrice rychlému debondingu. Chemické ošetření a adhezivy hrají v oblasti únavy také značnou roli, ale ta je omezena jen na daný druh vláken a danou chemikálii, obecně úpravou lze zvýšit únavové vlastnosti, jak počet cyklů, tak velikost zátěžného napětí [160].

3.7 Nedeformační metody zkoušení kompozitů

V průběhu života kompozitového dílu se vady uvedené výše indukují z důvodu zatěžování, nebo poškození může nastat v podobě impaktu či jiného kontaktu s cizím tělesem. Z hlediska odhalení velikosti poškození je nutné využít některou z diagnostických metod. Nejčastěji se

využívají metody nedestruktivní – NDT (non-destructive testing), aby díl v případě dobrého stavu mohl dále pracovat. Souhrn těchto metod je uveden na obr. 3.24.



Obr. 3.24 Souhrn nedestruktivním metod testování kompozitů [151].

Nejčastěji využívané metody NDT:

- vizuální kontrola (VI)/testování (VT),
- kontrola poklepem,
- ultrazvuková kontrola,
- termografické zkoušky,
- radiografické zkoušky,
- počítačová tomografie a mikro tomografie,
- elektromagnetické zkoušky,
- kontrola pomocí akustické emise,
- akusticko-ultrazvukové zkoušky,
- smyková zkouška,
- skenovací elektronová mikroskopie.

NDT zkušební metody vyžadují, aby poškození na povrchu materiálů a v jejich vnitřních částech byla řádně identifikována a charakterizována, aniž by došlo k řezu nebo úpravě materiálu v tom smyslu, že by došlo k jeho poškození, materiály jsou kontrolovány, hodnoceny a charakterizovány za účelem posouzení vad, podle zavedených norem pro zkoušení a norem pro materiály (ASTM E2533, 2017), aniž by došlo ke změně základních vlastností materiálu nebo k poškození či poškození zkoušeného materiálu. Při výběru NDT metody je třeba se řídit i ekonomickými nároky jednotlivých metod a možnosti v mobilitě jednotlivých měřicích aparatur. V mnoha případech se jedná o metody laboratorní, kdy je třeba připravit vhodný vzorek, který je dále zkoumá. Metody nedestruktivního zkoušení našly uplatnění v poměrně velkém množství oborů. Patří mezi ně mimo jiné jaderný průmysl, výroba, skladovací nádrže, letectví a kosmonautika, jaderný průmysl, průmysl výroby trubek a potrubí, bezpečnost, vojenství a obraně, jakož i charakterizace výrobních vad v KPV.

Existuje řada technik, které byly navrženy a použity při nedestruktivním zkoušení v oblasti různých KPV.

3.7.1 Vizuální kontrola

Vizuální kontrola je nejjednodušší, ale také nejméně spolehlivá metoda při hodnocení poškození. Její hlavní nevýhodou je že se soustředí pouze na povrchové viditelné vady a nikoli

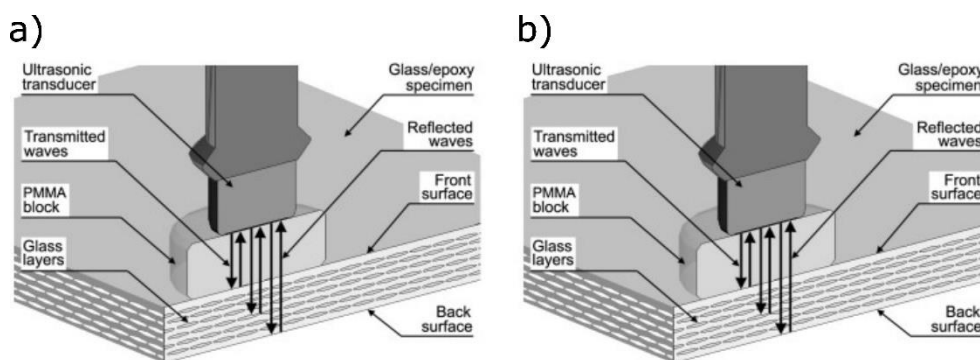
na vnitřní strukturální. V mnoha případech je lze odhalit pomocí porovnání vnější a vnitřní strany dílu, v případě že je zadní strana dosažitelná. V mnoha oblastech je tato metoda jako primární a nejčastěji prováděná. Výhodou metody je také její ekonomická náročnost, kdy nejsou třeba žádná zařízení. Nedokáže detekovat interní, nebo mikroskopická poškození, jako je delaminace, pórovitost, vměstky částic, praskliny, lomy vláken, zvlnění a zalomení, a to je jen několik příkladů. Limity metody jsou dány lidským zrakem [161].

3.7.2 Kontrola poklepem

Jde o obdobu vizuální kontroly, kdy se uživatel spoléhá na lidské smysly a hodnotí strukturu dle poklepu kladívkem, odezva je zvuková, kdy hlavním kritériem je změna v oblastech s poruchou a bez poruchy. Metoda se využívá velmi často pro hodnocení sendvičových konstrukcí a tlustostěnných dílců [162].

3.7.3 Ultrazuková kontrola

Je další z metod skládá se z vysílače, přijímače a zobrazovací jednotky, která vyhodnocuje a vizualizuje zpracované výsledky. Na základě získané informace ze zpracovaného signálu lze vyhodnotit a lokalizovat trhliny, delaminaci, velikosti dutin a pórovitosti (v rámci rozlišení přístroje) a také orientaci vláken. K detekci defektů a poškození se používají snímače ultrazvuku, které generují ultrazvukové vlny šířící se do kompozitu. Tato technika pokrývá široké frekvenční spektrum (od 1 MHz do více než 1 GHz), ale většina průmyslových aplikací ultrazvuku pro kompozity pracuje v rozmezí frekvencí 0,5 až 10 MHz [162]. Tyto metody jsou již dobře známy a také popsány pro standardní kompozity. Pro vyhodnocení se lze setkat s dvěma metodami, první využívá přijímač a vysílač na každé straně kompozitu, metoda - through transmission, druhá využívá pouze jeden přijímač/vysílač – metoda pulse-echo a je založena na měření času od vyslání signálu, jeho odrazu na rozhraní a návratu k přijímači. Metody jsou srovnatelné pro detekci vad i obsahu vláken v kompozitu, viz obr. 3.25 [163].



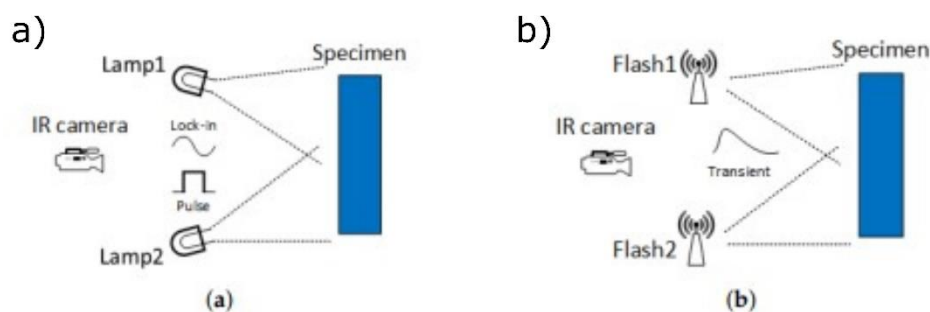
Obr. 3.25 Metody ultrazukové detekce a) pulse echo, b) through transmission [163].

Z hlediska kompozitů s přírodními vlákny se s nimi setkáme v práci Loganathana [164], který se zabývá zejména měřením tloušťky laminátu, nalezením pórovitosti a delaminace ve formě výrobních vad, jako je špatné prosycení. S metodami ultrazvuku se lze setkat i v [165], [166], [167]. Pro zlepšení detekce a zpřesnění měření se využívá vodní prostředí – vzorek je měřen v nádrži, tato metoda je ovšem pro kompozit s přírodními vlákny nevhodná z důvodu velké nasákavosti vlhkosti.

3.7.4 Termografické zkoušky

Metoda je založená na změně vlastností materiálu s poruchou a jeho reakci na přijímané teplo, vlivem rozdílné vodivosti a amplitudy dosaženého tepla. Metoda se také někdy nazývá termovizní kontrola. Jakmile je defekt dále od povrchu uvnitř materiálu, vykazuje při zahřívání

dílce rozdílný tepelný tok než okolní spojitě prostředí, a to se projevuje rozdílem teplot na povrchu dílce. Metoda je omezena pouze na tenké dílce a nedokáže detekovat vadu, která je menší než jeho tloušťka. Výhodou metody je její použití na velké plochy, rychlá detekce a senzor umístěný pouze z jedné strany. Je však třeba nákladné a citlivé vybavení, vysoce kvalifikovaných kontrolních pracovníků. Problémem je také správně identifikovat vadu a vyhodnotit její dopad na strukturu. Pro měření lze využít buď kontinuálního měření radiačního tepla a změny v čase, nebo pomocí pulsního záření a časového rozkladu, viz obr. 3.26 [168]. V případě využití pulsní metody lze skládat jednotliví snímky dohromady a vytvořit tak záznam odpovídající určité hloubce měření v laminátu, tento je tak velmi podobný záznamu z ultrazvukového měření [169].



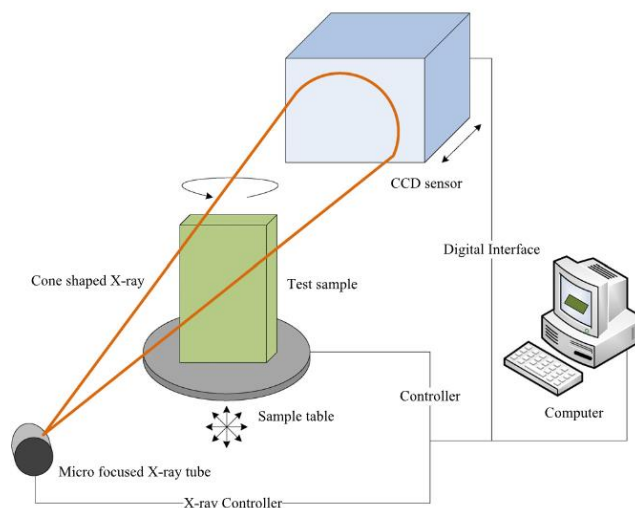
Obr. 3.26 Metody termografického měření a) pulsní, b) kontinuální [168].

3.7.5 Radiografické zkoušky

Jsou založeny na prozařování vzorků pomocí rentgenového záření. Existuje mnoho metod, které využívají tento princip a liší se schopností zobrazovat jednotlivé řezy, nebo celý objekt najednou. Liší se také intenzitou a záběrem paprsku. Pro kompozity je tato metoda výhodná zejména pro nalezení delaminace, kdy jsou vrstvy odděleny, a v materiálu vzniká vzduchová mezera, kterou lze snadno detekovat. Jednotlivé druhy dokáží zachytit i větší pórovitost a nehomogenitu materiálu, rozdílnou orientaci, mezi laminární trhliny a další poruchy. Pokročilejší metody, které slouží i pro sestavení 3D analýz materiálu se řadí k výpočtovým radiografickým metodám – XCT (X-ray computed tomography) tyto slouží pro studium vnitřní struktury materiálu a dovolují získat přehled, nejen o vadách, ale obecném rozložení vláken a matrice, případně dalších látek. Tyto metody lze použít jak pro makro, tak pro mikro pozorování a jejich přesnost závisí na rozlišení snímače a vysílače. V oblasti přírodních vláken různé metody studoval Bensadoun [170], který porovnával různé metody z hlediska zobrazování a možnosti rozpoznávání struktur i pro jednotlivá vlákna pomocí SEM CT.

3.7.6 Počítačová tomografie a mikro tomografie

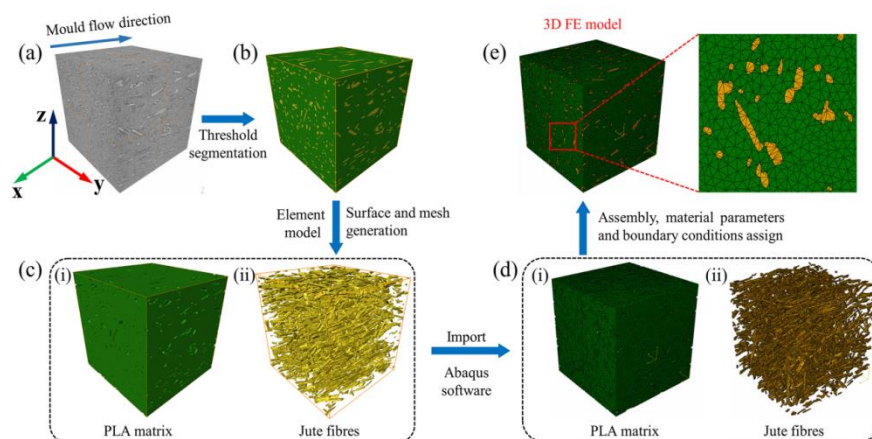
Počítačová výpočtová tomografie je speciálním případem radiografické metody uvedené výše. Je specifická svým využitím a omezena pouze na detekční přístroj kam je možné umístit vzorek. Svou konstrukcí je přístroj tvořen zářičem rentgenového záření, rotačním a naklápěcím stolem pro vzorek a detektorem umístěným na jednom rámu s možností posunu a tím skenování více rovin. Princip zařízení je uveden na obr. 3.27.



Obr. 3.27 Schéma zobrazující princip CT [171].

Otáčením vzorku je získáno velké množství 2D obrázků řezů. Po rekonstrukci se získá rozložení lineárního koeficientu útlumu podél řezu vzorku, kterým prochází záření. Micro-CT je velmi užitečný nástroj pro identifikaci strukturálních nehomogenit, dutin, trhlin, mikrotrhlin a poréznicích struktur v kompozitech, kde je významný rozdíl v hustotě. Na základě hustoty jednotlivých materiálů lze dále zpracovávat a filtrovat informace [171]. Když vyzářené fotony projdou objektem, část z nich se rozptýlí, zbytek se pohltí a zbytek projde. Útlum představuje absorbované nebo rozptýlené rentgenové záření, které je často výsledkem interakce s objektem. Útlum zabraňuje tomu, aby se část rentgenového záření dostala k detektoru. Vysílané fotony procházejí objektem pod individuálním úhlem a jsou zachyceny na detektoru, který je následně vizualizován počítačem. Vizualizace vytváří kompletní rekonstrukci snímaného objektu. Takto získaná 3D struktura dat o hodnotách šedi zobrazuje hustotu rozložení elektronů v měřeném objektu. Na rozdíl od jiných vizuálních skenovacích technologií, které zachycují mračno bodů na povrchu, vytváří CT skenování velké množství snímků. Ty se kombinují a vytvářejí soubor voxelových dat. Voxel představuje objemový prvek, nebo objemový pixel a při rozlišování částí účinně využívá rentgenový útlum. Jednotlivým materiálům jsou přiřazeny voxely dle jejich stupně šedi – hustotou úměrnou hodnotě rozptylu. Tématu se věnuje i dlouhodobě výzkumná skupina Ceitec VUT v Brně [172] [173] a mnoho dalších.

Mikro tomografie je odlišná pouze ve velikosti snímaného prostoru a rozlišení snímače. Zároveň je zde třeba dbát i na zvýšenou náročnost přípravy vzorku a vliv na výslednou strukturu. Rozlišení těchto metod se pohybuje od 2-3 μm a jako jedna z mále metod dovoluje pozorovat mikro defekty a poruchy jako jsou lomy vláken, oddělení matrice od vláken, mikropraskliny v matrici a jiné těžko pozorovatelné poruchy. S metodou se lze setkat nejen pro stanovení poruch a defektů, ale například i pro mechanické vlastnosti – fibre bundle test [174]. nejčastějším případem je studium vlivu matrice a vláken [175], [176], [177], [178] a další. Pro analýzu a predikci rozložení vláken mohou být využity i metody strojového učení [179], [180], [181]. Metoda mikro CT také je využívána pro získání podkladů pro simulace procesů výroby a mechanické odolnosti, obr.3.28 [182].



Obr. 3.28 Využití mikro-CT technologie pro získání MKP modelu pro simulace proudění matrice [182].

3.7.7 Elektromagnetické zkoušky

K identifikaci poruch a dalších vad jsou u této metody využívány elektrické a magnetické vlastnosti materiálu a jejich velikosti změny při zaznamenání anomálie. Je vyvinuto několik metod pro měření, jako jsou měření pomocí vířivých proudů, měření střídavého proudového pole, měření magnetického toku, měření magnetické indukce atd. [183].

Nejrozšířenější je metoda vířivých proudů, která pracuje s Faradayovým zákonem, podle kterého nespojitost v rozložení vodivosti způsobuje změnu impedance cívky. Proudové tečou z jednoho vlákna do druhého přes jejich kontaktní body, podél vláken. Tato metoda se často používá ke zjišťování poškození uhlíkových kompozitů. Defekty se projeví ve změně impedance zaznamenané prostřednictvím analyzátoru. Kontrola pomocí vířivých proudů se běžně používá při zjišťování trhlin, poškození nárazem, poškození vláken a korozi [184]. U materiálů se silně dielektrickými vlastnostmi, jako jsou přírodní vlákna, je využití těchto metod problematické.

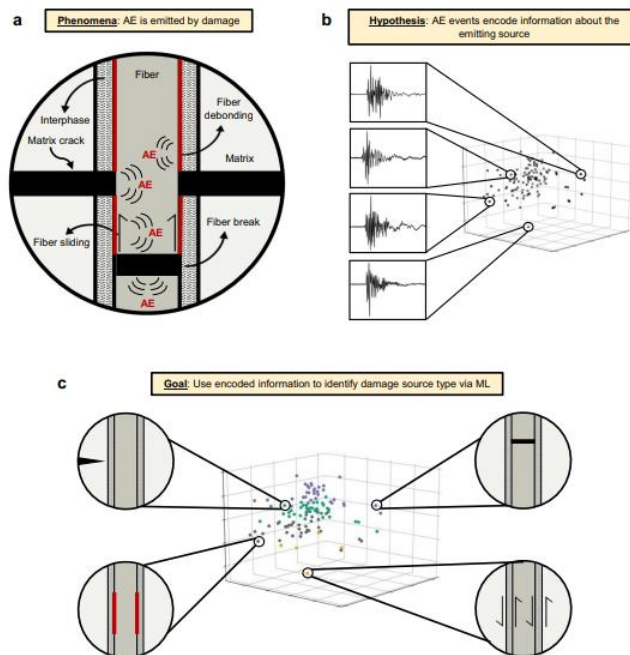
3.7.8 Kontrola pomocí akustické emise (AE)

Metoda akustické emise odlišuje od ostatních metod, hlavně díky principu snímání ze statických na dynamické zatěžování a zkoumání jeho odezvy. Hlavní odlišností je že, metoda akustické emise zachycuje zvuk z energie uvolněné ve vzorku kompozitního materiálu, na rozdíl od jiných metod, které dodávají energii do zkoušeného objektu. Dále metoda akustické emise dokáže detekovat dynamické změny v materiálu a rozlišuje mezi stagnujícími a rozvíjejícími se vadami. Mezi další výhody AE patří vysoká citlivost, schopnost zajistit kontrolu procesu s trvalou montáží snímače, bez nutnosti demontáže vzorku kvůli čištění a možnost použití více snímačů. Tato výhoda je hlavně pro makro a rychlou kontrolu.

AE je rovněž užitečná při detekci různých typů poškození způsobených únavovým zatížením, jako jsou lomy vláken, únavové trhliny, debonding vláken s matricí, mikrotrhliny v matrici a delaminace. Nevýhodou použití testování AE je však to, že vyžaduje vysoce kvalifikovanou obsluhu, která dokáže interpretovat data a přesně určit typ mechanismu poškození.

Hlavním problémem je správná dekompozice signálu a tím získání popisu vady. Když dojde k poškození kompozitu, nahromaděná deformační energie z různých poškození se uvolňuje jako AE do okolního prostředí, dokud ji nezaznamenají širokopásmové snímače. Zaznamenané průběhy jsou popsány pomocí typických průběhů signálu poškození, o nichž se předpokládá, že kódují informace o mechanismu poškození zdroje. Pro zpracování lze využít strojové učení,

kteře využívá tyto typické signály k tomu, aby dekodoval celý průběh AE a jednotlivé poruchy přiřadil k filtrovaným signálům, obrázek 3.29 [185].



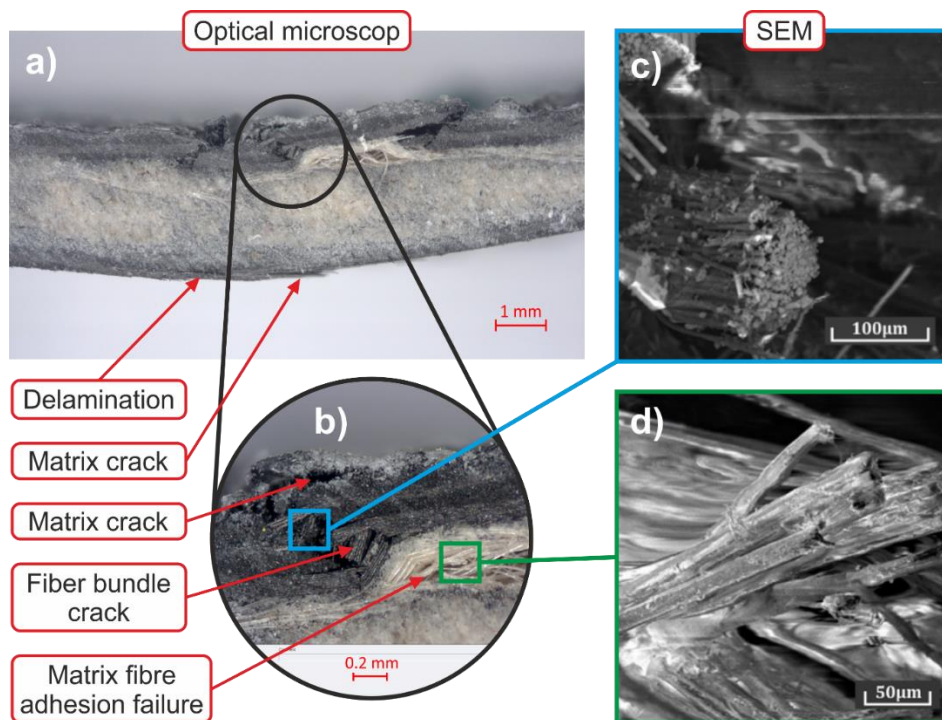
Obr. 3.29 Akustická emise a) princip vzniku a snímání poruch, b) dekompozice signálu pomocí známých záznamů poškození, c) využití metod strojového učení k rozpoznání poruch [180].

3.7.9 Smyková zkouška

Tato je realizována pomocí laserového paprsku, který je snímán pomocí polarizovaného snímače. Při selhání kompozitu často dochází ke koncentraci napětí. Úroveň koncentrace napětí, která obklopuje, určuje kritičnost vady. Smyková analýza se často používá na pěnových a voštinových strukturách. Její výhodou je také menší náchylnost k šumu ve srovnání s mnoha jinými typy NDT technik. Je ovšem vyžadována zkušená obsluha, která dokáže rozeznat typ vady. To je i hlavní nevýhoda metody kdy stejná odezva může být pro více vad, proto je často využívána jako doprovodná metoda, kdy se přesný typ vady prověří jinou NDT metodou.

3.7.10 Skenovací elektronová mikroskopie (SEM)

Je jednou z pozorovacích metod, kdy je vzorek snímán pomocí detekce emitovaných elektronů. Jedná se o metodu, kdy je viditelný pouze povrch součásti, nebo zkoumané vady a mechanismy jsou pozorovatelné díky elektronovému nasvícení, kdy můžeme srovnávat různé materiály v jednom nasvícení. Pro pozorování lze zvolit dvě metody, a to pomocí zpětně odražených, nebo sekundární elektronů. Sekundární elektronů jsou elektrony generované přímo z místa dopadu primárního svazku do hloubky maximálně několika desítek nanometrů. Jsou nositeli informace o topografii čili tvaru povrchu vzorku. Díky velké hloubce ostroty a vysoké rozlišovací schopnosti (dané užitím elektronů, jejichž vlnová délka je výrazně kratší než u viditelného světla) využíváme obrazu vzniklého zpracováním signálu sekundárních elektronů pro analýzu povrchů a struktur či pro měření rozměrů, např. částic. Jelikož jsou sekundární elektrony detekovány pod určitým úhlem vůči povrchu vzorku, vznikají na obraze světlejší a tmavší místa, která vytvářejí trojrozměrný efekt, který je výhodný pro pozorování kompozitních struktur. Rozdíl mezi zobrazením z optického mikroskopu a SEM je dobře patrný z obr. 3.30 a-c.

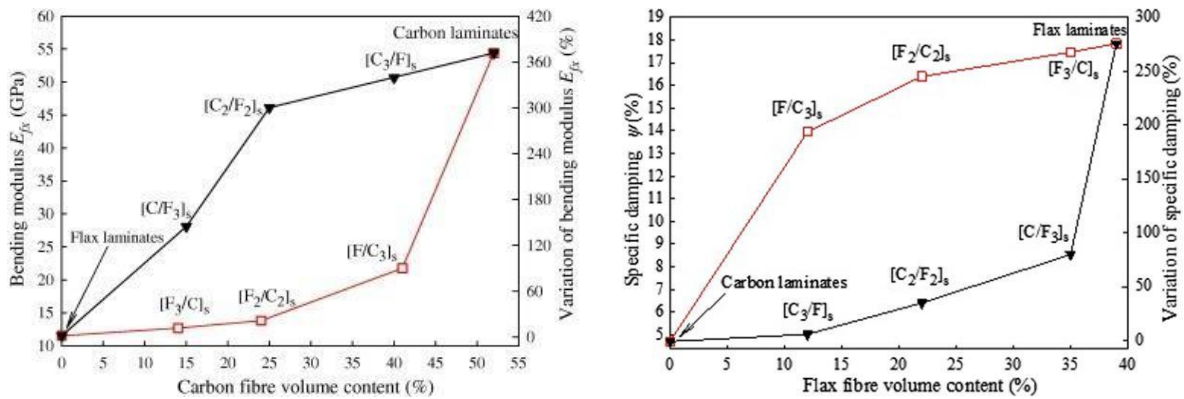


Obr. 3.30 a,b) optická mikroskopie vzorku len -uhlíkové vlákno, c,d) SEM zobrazení [186].

3.8 Vibrace a utlum KPV

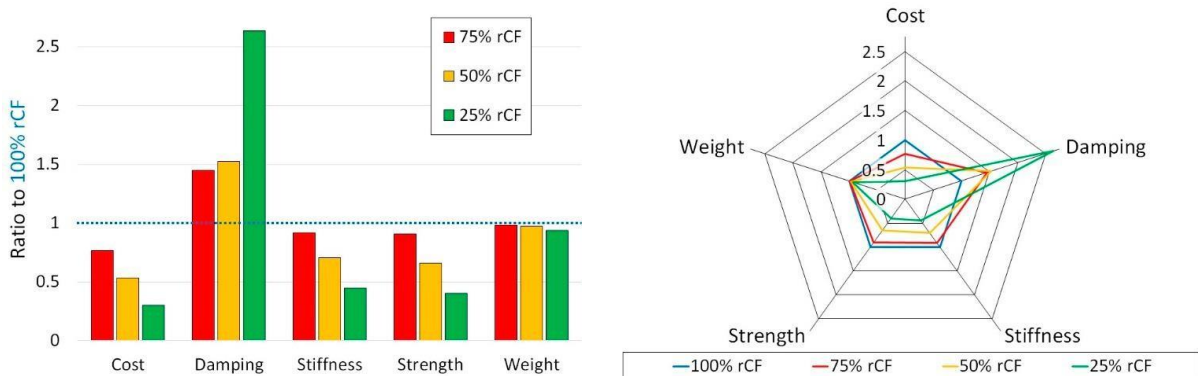
Řada studií zkoumala dynamické chování hybridních kompozitů s přírodními vlákny, zejména lnu v různých aplikacích. Kumar [187] zjistil, že kompozity len/epoxid vykazují zlepšené dynamické mechanické vlastnosti a tlumení zvuku. Cihan [188] uvedl, že hybridizace lnu s vlákny E-skla může zvýšit tlumení, ale na úkor pevnosti v tahu. Fiore [189] a Ameer [190] oba zjistili, že přidání uhlíkových vrstev (hybridizace kompozitu) může významně zlepšit mechanické vlastnosti lnených kompozitů. Rahman [191] a Daoud [192] oba zdůraznili významný dopad obsahu a orientace vláken na tlumicí vlastnosti lnených kompozitů. Fiore [193] a Hu [194] dále zkoumali vliv environmentálních faktorů a podmínek zatížení na dynamické chování, přičemž Fiore [193] zjistil, že ošetření vláken může zlepšit trvanlivost a tlumicí vlastnosti.

Dhakar a kol. [195] v práci hodnotili KPV ke zlepšení houževnatosti, tlumících schopností, ekologických vlastností a příspěvek uhlíkových vláken ke zlepšení tepelných a mechanických vlastností hybridních kompozitů. Další uváděné výsledky ukázaly vliv hybridizace a pořadí vrstvení lnu a uhlíku na tuhost v ohybu a tlumicí vlastnosti hybridních materiálů [196] [197] [198]. Bylo zjištěno, že KPV s vnějšími vrstvami z uhlíkových vláken mají vyšší modul pružnosti v ohybu a nižší tlumení než hybridní kompozity s vnějšími vrstvami z FF, protože rozptyl energie je směřován především vnějšími vrstvami kompozitů, viz obr. 4.31.



Obr. 3.31 Vývoj modulu pružnosti v ohybu a měrného tlumení v závislosti na objemovém obsahu lněných vláken pro různé sekvence skládání při frekvenci 500 Hz [197]. Například sekvence stohování F3 C odpovídá FFFCCFFF a poměru objemového podílu 14/35 % CF/FF.

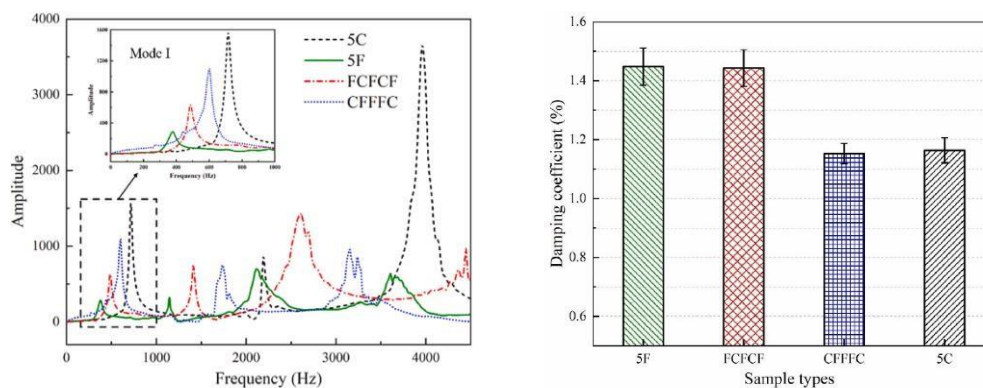
Později Assarar a spol. [199] zkoumali účinky přidání viskoelastických vrstev z vinyllethylenu a vinylu. Spojení lnu a visko-elastických vláken umožňuje zvýšit tlumení KPV a hybridů o 25-45 %, aniž by to mělo vliv na dynamické chování. V [67] autoři ukázali, že tlumení hybridního kompozitu s vnějšími vrstvami ze lnu je o 196 % vyšší než u nehybridního kompozitu a u kompozitu s vnějšími vrstvami z uhlíku je vyšší přibližně o 6 %. Longana a spol. v práci [200] studovali výhody hybridizace KPV a regenerovaného uhlíkového kompozitu pomocí metody výroby vysoce výkonných přerušovaných vláken. Autoři ilustrovali, že hybridní kompozity mohou být životaschopným řešením v aplikacích umožňujících snížení primárních mechanických vlastností oproti zvýšení hlučnosti, vibrací a útlumu. Porovnali charakteristické a naměřené vlastnosti 100% uhlíkového kompozitu a hybridního kompozitu vyztuženého přerušovanými vlákny FF/rCF, obr. 4.32.



Obr. 3.32 Srovnání vlastností vzorků 75/25, 50/50, 25/75 % FF/rCF se 100 % rCF [200].

Ben Ameer a spol. v práci [201] zkoumali mechanické chování hybridu při statickém a únavovém tahovém zatížení. Autoři ilustrovali na jedné straně zvýšení únavové pevnosti a únavové odolnosti s nárůstem objemového podílu uhlíkových vláken a na druhé straně zvýšení tlumicího poměru a únavové životnosti s nárůstem objemového podílu FF. Wang et al. [202] ukázali, že hybridizace posiluje pevnost v tahu a modul pružnosti a zvyšuje absorpci energie, přičemž je patrná závislost na pořadí vrstvení uhlíku a přírodních vláken. Kromě toho autoři zjistili, že absorpce vody a rychlost difuze molekul vody u hybridů je nižší než u KPV, zejména pokud jsou uhlíkové vrstvy umístěny na povrchu. Autoři později zkoumali [203] vliv pořadí vrstvení uhlíku a lnu na odolnost proti nárazu a tlumicí vlastnosti hybridního kompozitu. Tyto mají lepší schopnost absorbovat energii, pokud je povrchová vrstva vyztužena

Uhlíkovými vlákny (sekvence CFFFC). Jejich primárním způsobem poškození je mezivrstva delaminace. Bylo zjištěno, že tlumicí vlastnosti jsou vyšší pro střídavou sekvenci skládání FCFCF než pro sekvenci FCFCF, která je o 26,4 % vyšší než u uhlíkových kompozitů, viz obr. 4.33. Wang a spol. studovali [204] absorpci vody, ohybové vlastnosti a termodynamiku jednosměrného hybridního materiálu pod vlivem ponoření do vody. Přidání uhlíkových vrstev do KPV zlepšuje trvanlivost a mechanické vlastnosti a snižuje rovnovážnou nasákavost a difuzní koeficient. Nejvyšší hydrotermální odolnost byla zjištěna u uhlíkových kompozitů na povrchu.



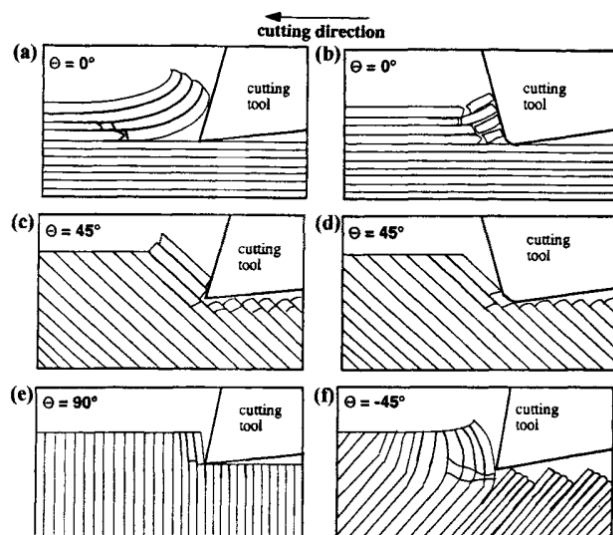
Obr. 3.33 Křivky přenosové funkce a koeficient tlumení prvního řádu čtyř druhů kompozitů [203].

Pro hlubší pochopení mechanického chování a režimů poškození lze použít hodnocení akustické emise – možná ve spojení s dalšími moderními metodami [133]. Výstupem je funkce frekvenční odezvy (FRF) založená na datech signálů vibrační odezvy získaných jedním nebo více mikrofony [205]. FRF nabízí sadu lineárních rovnic, které jsou řešeny algoritmem nejmenších čtverců s ohraničenými proměnnými. Minimální počet přirozených frekvencí a tvarů modů použitých pro výpočet matic FRF je tři [206] [207].

3.9 Obrábění kompozitních materiálů s přírodními 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 mnoho 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 ovlivňují nejen řezná rychlost, geometrie nástroje a podmínky řezání, ale především fyzikální vlastnosti zpracovávaného materiálu, vyžaduje každá kategorie kompozitních materiálů specifický přístup k hodnocení. Výzkumem těchto vlastností, procesem a návrhem nástrojů se na VUT v Brně zabýval doc. Humár – vrtání skelných kompozitů, dále se v současnosti problematice věnuje ČVUT – RCMT skupina doc. Koláře, doc. Zemana [209] a pracoviště obrábění TU Liberec.

Při zkoumání obrábění přírodních materiálů lze vyjít z mikro mechanického principu a z modelu řezání vrstvy z vláken skloněné k nástroji pod daným úhlem, tento model zpracoval Ramulu [210] který i definuje jednotlivé stavy porušení materiálu pro daný úhel vláken, obrázek 3.34.



Obr. 3.34 Schematický popis řezných mechanismů při ortogonálním obrábění kompozity (uhlík/epoxy): (a) delaminace; (b) vzpěr vláken; (c a d) řezání vláken; (e) deformace; (f) stříh [210].

Chegdani [211] který se věnoval i simulaci a sestavení fyzikálního modelu. Porovnání s dalšími materiály zejména pro vrtání provedl Slamani [212], kde definuje jako jeden z hlavních problémů při frézování KVP otřepy. Celik [213] na jutovém materiálu testoval vliv řezných rychlostí, posuvu, směru vláken a počtu břitů nástroje na řezné síly, delaminaci a drsnost povrchu při drážkování. Problematika je dále řešena v dalších pracích typu review [214] [215] [216] [217]. Většina těchto prací se zabývá vrtáním a pouze okrajově frézováním, nebo obráběním vodním paprskem [218] a dalšími technologiemi, nebo se zaměřují na kompozity dřevo plast.

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Na základě teoretických znalostí a literární rešerše výše byly stanoveny experimentu, které vedou k cíli práce, a to je komplexní pochopení a výzkum chování kompozitů s přírodními vlákny, konkrétně lněnými. Navrhnuté experimenty a zpracovávané vzorky by měly vést k doplnění nebo rozšíření teoretických vlastností a být využitelné v aplikační praxi, stejně tak jako jejich podmínky a parametry.

4.1 Ověření mechanických vlastností za různých podmínek

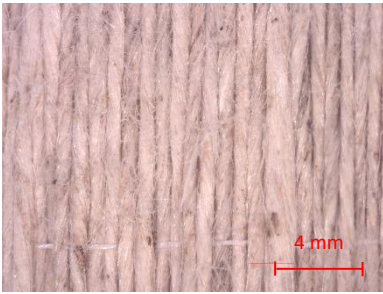
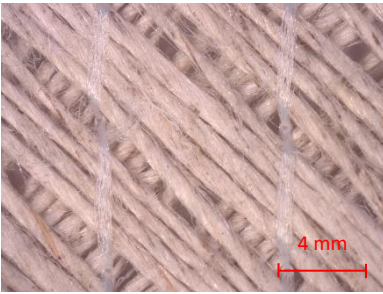
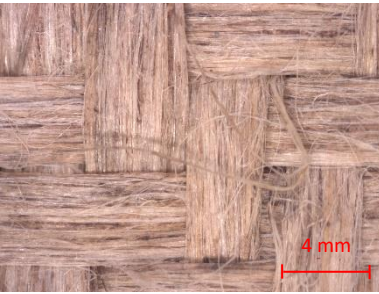
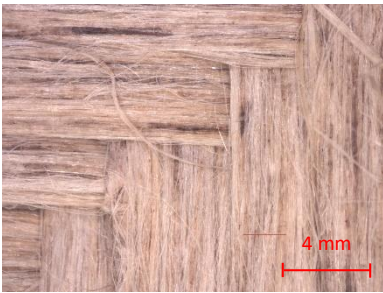
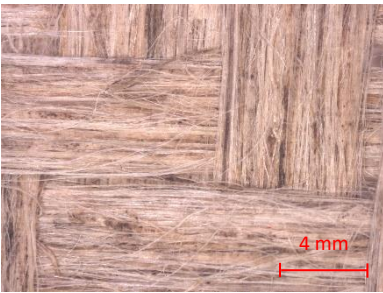
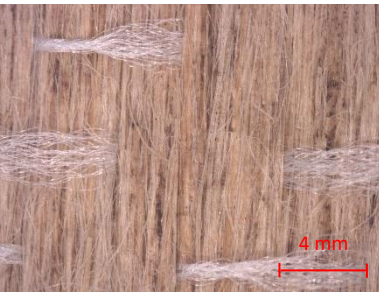
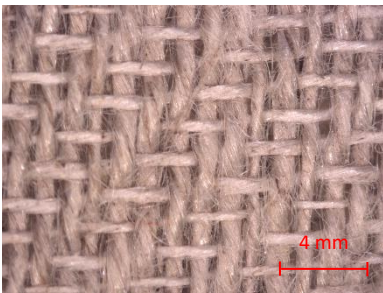
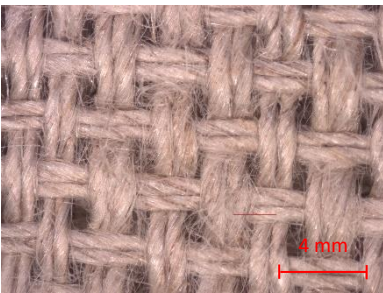
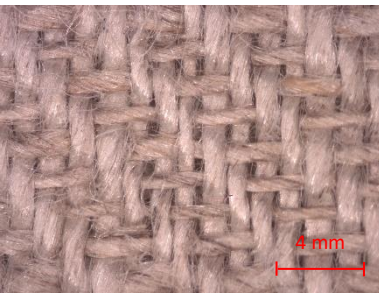
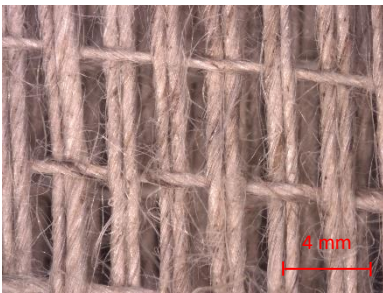
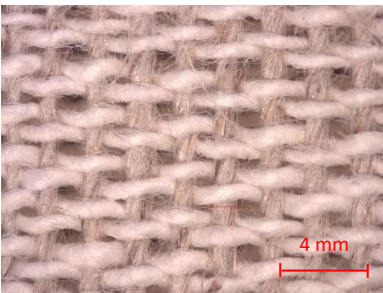
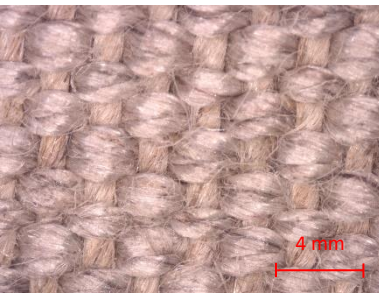
V první části bylo přistoupeno k výrobě vzorků kompozitů z různých materiálů za použití nejběžnějších výrobních metod pro účely porovnání jejich mechanických vlastností a chování vzhledem k materiálu z lněných vláken. Lněná vlákna byla vybrána na základě rešeršní části, jako nejvíce aplikovatelná v průmyslové 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 200g/m^2 . Technologie výroby jsou zvoleny, ruční laminace, vakuová infuze (VARTM) a výroba v autoklávu pomocí prepregových materiálů.

4.1.1 Výroba vzorků

Lněný materiál byl vybrán od firmy by B-Comp Ltd. (Fribourg, Switzerland). Firma B-Comp se specializuje na výrobu tkanin pro účely výroby kompozitních materiálů, vlákna jsou již pro tento účel upravena a tkaniny jsou uzpůsobeny pro vrstvení kompozitů. Vzorky tkanin jsou uvedeny v tabulce 4.1, foceno pomocí optického mikroskopu. Pro srovnání jsou zde uvedeny i materiály jiných výrobců, které nejsou primárně určeny pro kompozitní materiály – Belgické firmy Flaxco a České Svitap (výrobce v roce 2022 ukončil výrobu). Zejména si lze všimnout rozdílných struktur osnovy a útku, které jsou kruhového průřezu a tím vznikají značné mezery mezi jednotlivými řadami. Tvarem budem také dán velký podíl pryskyřice vůči vláknům a potenciální vznik porovitosti v mezerách mezi jednotlivými rowingy.

U výrobku B-comp pro vlákna o 150 Tex se setkáváme s tahovou pevností suchých vláken 580 MPa [12] a modulem až 61 GPa při zatěžování rovnoběžně s vlákny. Další výrobci přesné hodnoty neuvádí. V literatuře se lze setkat s obdobnými hodnotami, které závisí zejména na výpočtu pružezu vláken [219].

Tab. 4.1 Suché lněné tkaniny.

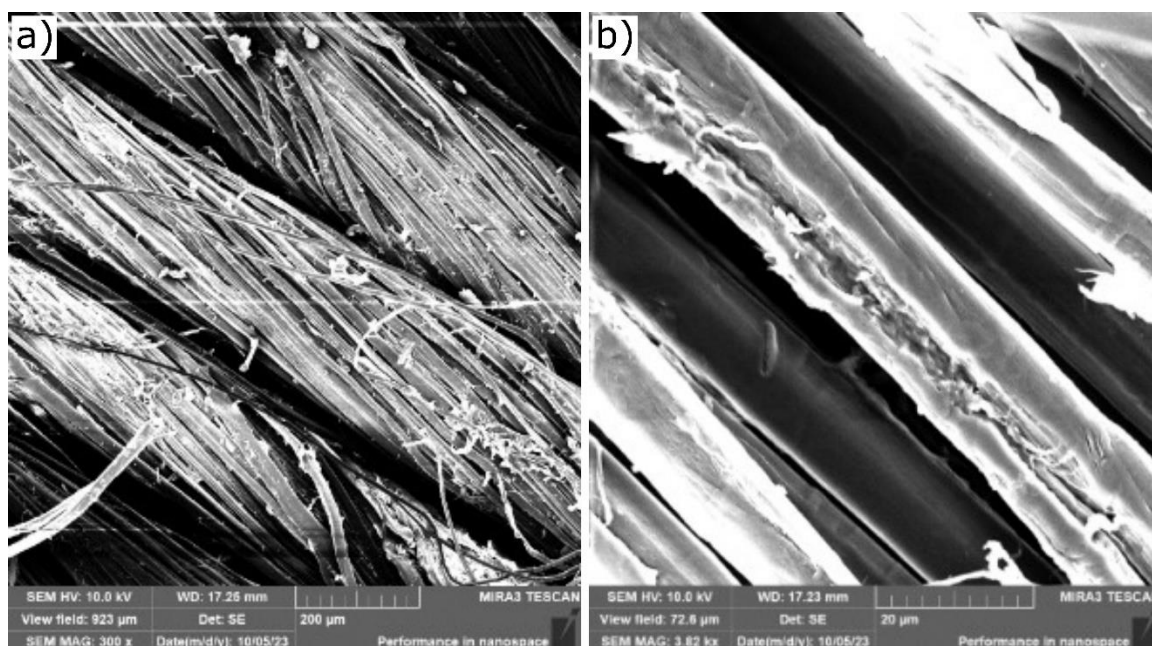
		
B-comp 5009	B-comp 5018	B-comp 5040
		
B-comp 5042	B-comp 5043	B-comp 5057
		
Flaxco NM26	Flaxco basket2	Flaxco Twill2
		
Flaxco UD2020	Svitap 260	Svitap 570

Vlastnosti lněných tkanin od různých výrobců jsou uvedeny v tabulce 4.2.

Tab. 4.2 Vlastnosti lněných tkanin od různých výrobců.

Tkanina	Vzor	Gramáž [g/m ²]	Vlákna [Tex]	Tloušťka [mm]
B-Comp 5009	UD	300	105	0,33
B-Comp 5018	Bi-Ax	350	105	0,29
B-Comp 5040	kepr 2/2	300	300	0,62
B-comp 5042	kepr 4/4	500	500	0,45
B-comp 5043	kepr 2/2	200	300	0,35
B-comp 5057	UD	150	300	0,32
Flaxco NM26	kepr 2/2	200	-	0,25
Flaxcco basket 2x2	košík(basket)	270	-	-
Flaxco Twill 2	kepr 2/2	270	-	-
Flaxco UD 2020	UD	150	-	-
Svitap 260	plátno	260	-	-
Svitap 570	košík(basket)	570	-	-

Vlákna využitá pro experimenty jsou zobrazena pomocí SEM na obr. 4.1a a 4.1b. TESCAN MIRA 3 (TESCAN ORSAY HOLDING, a.s.). Hodnocené vzorky byly před vlastním mikroskopováním opatřeny 4 nm vrstvou Pt-Pd (Quorum Q 150R ES). Uvedená nanovrstva nedokázala dostatečně zajistit vodivost hodnocených vzorků, které se v komoře mikroskopu nabíjely, a tak mají některé snímky nižší kvalitu. Je zde patrný členitý povrch vlákna s nahodilou strukturou.



Obr. 4.1 Vzorek lné tkaniny bez úpravy. a) Na přehledových snímcích je patrné rozložení vláken a zákrut vláken. b) Na detailním snímku je patrný charakter povrchu jednotlivých vláken, případně jejich poškození.

Pro výrobu vzorků byly zvoleny materiály Bcomp 5057, Bcomp 5018 a Bcomp5040. Tyto vzorky byly nadále testovány s materiály běžně dostupnými a používanými – skelní tkanina, Uhlíkové vlákno, tabulka 4.3.

Tab. 4.3 Vlastnosti použitých skelných a uhlíkových tkanin.

Tkanina	Vzor	Gramáž [g/m ²]	Vlákna [Tex]	Tloušťka [mm]
E-Glass (EC9)	Bi-Ax	260	300	0.29
E-Glass (EC9)	Twill 2/2	200	68	0.23
Uhlík (GG200T)	Twill 2/2	200	200	0.20

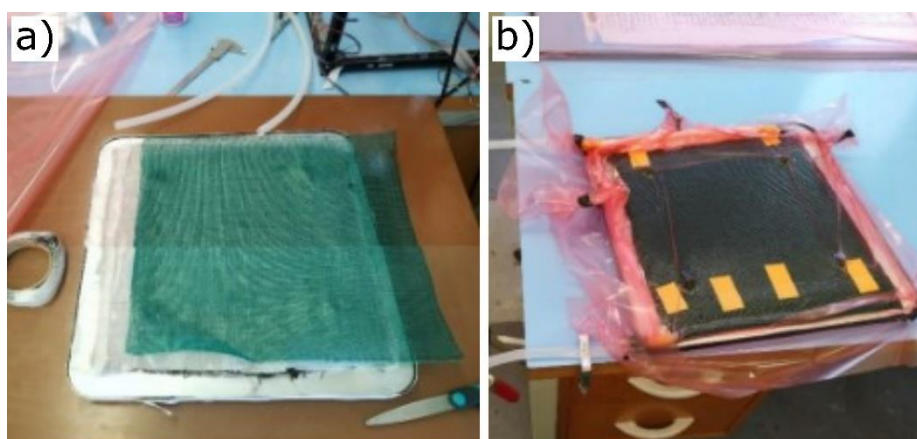
Pryskyřice pro výrobu byla využita standardní používaná v průmyslu z důvodu snadné dostupnosti, prověřených parametrů a stability testů. Jedná se o pryskyřici LG 700 s tužidlem HG 700 firmy GRM systems, což je epoxidový systém nové generace, na bázi silně modifikované epoxidové pryskyřice a několika tvrdidel, kterými lze nastavit rozdílnou zpracovatelnost a podmínky vytvrzení. Laminační pryskyřice LG 700 je velmi tekutá pryskyřice se zvýšenou vazností a reaktivitou, vyznačující se mimořádnou flexibilitou při zachování velmi vysoké teplotní odolnosti. Pryskyřice obsahuje modifikační činidla, maximálně zlepšující průnik laminační směsi do tkaniny. Tužidlo HG 700 je základní varianta tužidla pro epoxid LG 700. Je velmi tekuté, a proto vhodné pro infuzi i těch nejtenějších materiálových skladeb. Gel-time (100 g) při 23 °C je 90 minut [220]. Další parametry jsou uvedeny v tabulce 4.4. Směšovací poměr pryskyřice a tužidla je 100:30 váhově. Vzorky byly

vytvrzeny v pokojové teplotě 20–23 °C a ponechány minimálně 5 dní k dotvrzení, nebylo aplikováno žádné teplotní dotvrzení (postcure).

Tab. 4.4 Vlastnosti pryskyřice LG 700 po vytvrzení [220].

Vlastnosti	Hodnota
Mez pevnosti v ohybu [MPa]	110 - 120
Modul v ohybu E [MPa]	2700 - 3300
Mez pevnosti v tahu [MPa]	65 - 75
Mez pevnosti v tlaku [MPa]	120 - 140
Tažnost [%]	6 - 8
Rázová houževnatost [kJ/m ²]	38 - 48
Shore D [-]	85

K výrobě všech vzorků byla využita metoda vakuové infuze [221] [222]. Vyráběny byly desky o rozměrech 300 x 300 mm, které následně sloužily k nařezání vzorků pro další testy. Desky byly vyrobeny na separovaném sklu, separátor byl využit Oskar M700. Pracovní postup byl následující: na sklo byla položena daná skladba tkanin, strhávací tkanina, rozváděcí mřížka. Po okrajích byl nainstalován přívod pryskyřice pomocí spirálové hadice a přívod vakua, který byl realizován pomocí spirálové hadice opatřené membránou proti pronikání pryskyřice. Díky membráně není odsáta pryskyřice a nemůže dojít k neprosycení krajních oblastí. Obvod skla byl zaizolován pomocí butylkaučukové pásky a celá sestava zabalena do vakuovací fólie s průtažností 300 %. Po prvotním vakuování a testu těsnosti byly materiály vakuovány po dobu min 2 h před začátkem infuze. Sestava je zobrazena na obrázku 4.2.



Obr 4.2 Proces vakuové infuze (a) připravené materiály (b) díl napuštěn pryskyřicí.

Před samotným infuzováním byla pryskyřice vakuována pro odstranění bublin vzniklých při míchání. Po napuštění dílu pryskyřicí byl uzavřen přívod pryskyřice, vakuum bylo ponecháno do vytvrzení dílu – 24h.

Kombinace materiálů a vlastnosti výsledných vzorků jsou uvedeny v tab. 4.5. Při využití balancovaných tkanin byla snaha o vytvoření balancovaných symetrických laminátu se

skladbou (0/90; ± 45) S, nebo jejich násobky, které by měli quasi izotropní vlastnosti [21]. Objemové množství vláken bylo spočítáno dle vztahů (2.12) výše.

Tab. 4.5 Vzorky a jejich vlastnosti, C - uhlík; CF- uhlík len hybrid; G - sklo; F – len.

Vzorek	Vzor	Skladba - vrstvy	Tloušťka [mm]	Hustota laminátu [g/cm ³]	Mn. vláken objemově [%]
I-C01	Twill 2/2	8xC	2,02 \pm 0,03	1,47	44,04
I-C02	Twill 2/2	4xC	1,05 \pm 0,02	1,39	42,32
I-CF01	UN	8*C+F (hybrid)	2,65 \pm 0,02	1,30	46,02
I-CF02	Twill 2/2	C+C+F+C+C	1,48 \pm 0,05	1,29	39,12
I-CF03	Twill 2/2	C+C+1/2F+C+C	1,03 \pm 0,04	1,50	38,08
I-CF04	Twill 2/2	C+C+F+F+C+C	2,25 \pm 0,04	1,42	31,72
I-G01	Twill	4xG	1,10 \pm 0,03	1,55	35,93
I-G02	Bi-axial	4xG	1,31 \pm 0,02	1,76	45,73
I-G03	Twill 2/2	8xG	2,02 \pm 0,03	1,70	39,52
I-F-T1	Twill	4xF	1,8 \pm 0,05	1,11	28,16
I-F-BI	Bi-ax	4xF	2,65 \pm 0,06	1,19	37,36
I-F-T2	Twill	8xF	3,50 \pm 0,07	1,21	28,96
I-F-UD	UD	8xF	2,60 \pm 0,04	1,22	51,10

Z tabulky 4.5 je patrné, že nejvyšších hodnot objemového množství vláken dosáhly uhlíkové a hybridní kompozity. Přesné hodnoty v závislosti na objemu pórovitosti budou stanoveny dále.

Další výrobní metodou pro stanovení vlastností byla ruční laminace. Při této byla využita stejná pryskyřice jako pro metody vakuové infuze LG700 s tužidlem HG 700. Vzorek materiálů byl připraven pouze z lněné tkaniny Twill 2/2 Bcomp 5040. Jednotlivé vrstvy byly prosyceny na separované skelné desce a za použití válečku a strhávací tkaniny bylo vytlačeno co nejvíce přebytečné pryskyřice. Laminát byl vytvrzen volně bez vakua. Objemové množství vláken bylo dále stanoveno na 21,75 %, jedná se tedy o nejhorší výsledek ze zvolených metod.

Výroba v autoklávu pomocí prepregů byla třetí variantou výrobní technologie. Použitý autokláv firmy Maroso S.r.l. (Itálie), který je plně automaticky řízený, je zobrazen na obrázku 4.3. Suchá tkanina Bcomp 5040 byla impregnována firmou Meem, s.r.o. (Plzeň, Česká republika). Byla využita metoda hotmelt s pryskyřicí ER 38. Jedná se o pryskyřici s dlouhou životností a dobrou lepivostí. Z důvodu dobré smáčivosti lněného kompozitu bylo zvoleno množství pryskyřice v prepregu na 45 % objemového podílu. Základní vytvrzovací cyklus je při 120 °C 60 min výdrž. Typický doporučený cyklus je následující [223]:

- díl pod plným vakuem (-0,9 bar),
- náběh tlaku autoklávu: 1–7 bar,
- zahřívání při 2–4 °C na teplotu 100–130 °C,
- výdrž na zvolené teplotě po dobu 45–120 min,
- chlazení: 2–5 °C/min,
- otevření autoklávu při teplotě 65 °C a nižší.

Výsledné parametry pryskyřice [223]:

- mez pevnosti v ohybu: 150 MPa,
- modul v ohybu: E 3 100 MPa.

Při srovnání s pryskyřicí LG 700 dosahuje o 10 MPa lepších hodnot pevnosti v ohybu.



Obr. 4.3 Autokláv využitý k výrobě vzorků.

Pro výrobu testovacích dílů bylo využito naseparovaného skla, kde se skládaly vzorky dle skladby. Další vrstvy tvořila, strhávací tkanina, separační fólie, odsávací rohož a vakuovací fólie, k těsnění byla využita butylkaučuková páska. K přívodům vakua se použil ventil s rychlospojkou. Po zabalení byly díly vakuovány po dobu 1h, následoval test těsnosti a vytvrzení v autoklávu. Hotové díly byly ořezány na dané rozměry. V tabulce 4.6 jsou uvedeny vyrobené vzorky. Kromě čistě lněných vzorků byly také vyrobeny dva typy hybridních laminátů, buď s jednou, nebo dvěma vrstvami lnu ve střední vrstvě. U hybridních tkanin byla využita uhlíková tkanina GG 200T s pryskyřicí ER38.

Tab. 4.6 Parametry laminátu vyrobených v autoklávu.

Vzorek	Vzor	Skladba - vrstvy	Tloušťka [mm]	Hustota laminátu [g/cm ³]	Mn. vláken objemově [%]
A-F-A	Twill 2/2	4xlen	2,73 ± 0,07	1,47	46,24
A-F-B	Twill 2/2	8xlen	5,35 ± 0,12	1,39	49,85
A-CF-C	Twill 2/2	C+C+L+C+C	1,90 ± 0,04	1,30	45,64
A-CF-D	Twill 2/2	C+C+2L+C+C	2,58 ± 0,03	1,29	45,76

Z porovnání metod je patrné již podle vypočteného podílu objemového množství vláken, že výrobou v autoklávu lze dosáhnout vyšších hodnot objemového podílu vláken než za použití vakuové infuze. Je to dáno zejména tlakem při procesu vytvrzování a také prosycením tkaniny již před samotnou výrobou optimálním množstvím pryskyřice.

Dílčí závěry

Výroba KPV pomocí zvolených metod je možná z hlediska prosycení je nejvýhodnější metoda prepregu a autoklávu, kde 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 spojená i větší spotřeba pryskyřice. Materiál je vždy potřeba zpracovávat pod tlakem vlivem tkaní materiálu a samotných vláken, které mají oproti skelným nebo uhlíkovým tkaninám větší objem.

4.1.2 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 lumenu a jejich růstu. Dalším faktem je horší smáčivost vůči pryskyřicím, kterou lze do jisté míry ovlivnit zpracováním a následnou úpravou vláken. Teoreticky byl vznik porosity rozebrán v kap. 3.5.1 výše.

Určení dutin výpočtově:

V případě využití vztahu 2.12 lze poté objem dutin definovat jako:

$$V_p = 1 - (V_f + V_m) \quad (4.1)$$

Pak:

$$V_f = \frac{\frac{m_f}{\rho_f}}{L \cdot w \cdot h} = \frac{\frac{n_{\text{vrst}} \cdot m_t \cdot L \cdot w}{\rho_f}}{L \cdot w \cdot h} = \frac{n_{\text{vrst}} \cdot m_t}{h \cdot \rho_f} \quad (4.2)$$

Kde m_t je váha tkaniny, dále uvažujeme objemový podíl matrice jako:

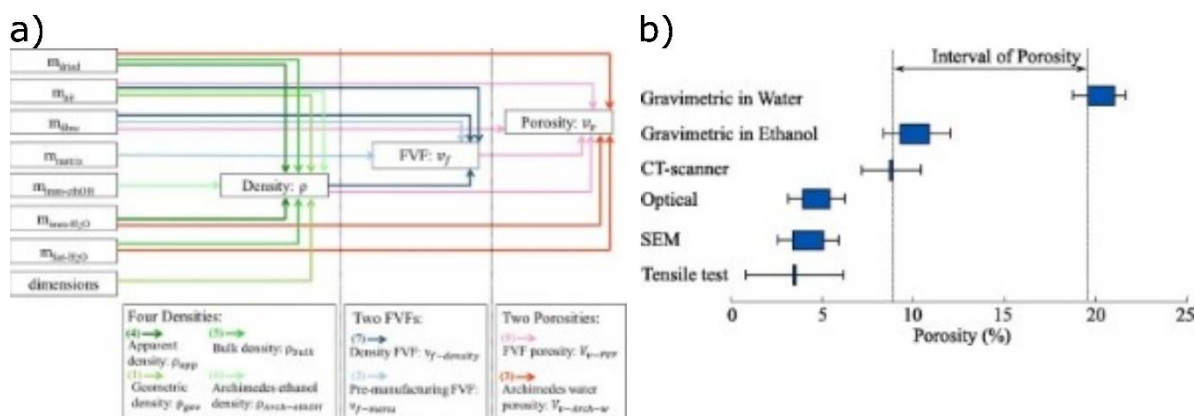
$$V_m = \frac{\frac{m_m}{\rho_m}}{L \cdot w \cdot h} = \frac{\frac{m_c - m_f}{\rho_m}}{L \cdot w \cdot h} = \frac{m_c - m_f}{\rho_m \cdot L \cdot w \cdot h} \quad (4.3)$$

Pro případ hybridních kompozitů platí:

$$V_{\text{fh}} = \frac{\frac{m_{f1}}{\rho_{f1}} + \frac{m_{f2}}{\rho_{f2}}}{L \cdot w \cdot h} = \frac{\frac{n_{\text{vrst1}} \cdot m_{t1} \cdot L_1 \cdot w_1}{\rho_{f1}} + \frac{n_{\text{vrst2}} \cdot m_{t2} \cdot L_2 \cdot w_2}{\rho_{f2}}}{L \cdot w \cdot h} \quad (4.4)$$

Kde veličiny s indexem 1 a 2 rozlišují tkaniny použité v hybridním kompozitu, tyto se mohou lišit jak svou hustotou, tak jejich objemem využitým v laminátu. U hybridních kompozitů se nemění výpočet pórovitosti. Výpočet je velmi závislý na přesném určení hodnot hustot jednotlivých komponent, tato je nejčastěji určována pomocí kalorimetrické metody pomocí ASTM D792, nebo ISO 10545-3 pomocí ethanolu a vody. Přesné měření hustot lze také zajistit pomocí pyknometrických metod, kdy je využito měření s přesně daným objemem tekutiny (plynu) o známé hustotě. Tyto metody mají ovšem u přírodních materiálů značné omezení,

vlivem jejich nasákavosti a náhodného rozdělení vláken a jejich rozdílných vlastností v různých částech tkaniny. Důležitou roli také hraje úprava vláken před splétáním do útků a tkanin, které uvádí ve své práci Cheris at al [224]. Porozita je také u přírodních vláken závislá na objemovém podílu vláken, do podílu 40 % je nízká do 3 %, ale s narůstajícím objemem vláken roste až na 15 % při podílu 60 % [225], [146]. Měření porozity u lněných vláken pomocí různých metod shrnuje De Kergariou [226], který se věnoval měření pomocí různých metod velmi dobře systematicky zmapovaných, obrázků. 4.4 a srovnával měření s již publikovanými daty a v závěru konstatuje, že v závislosti na použité metodě je vyhodnocení pórovitosti značně odlišné, v jeho případě je to od $8,3 \pm 2,3$ to $19,6 \pm 0,9$, nejnižších hodnot dosahuje pro analytický výpočet modulu, optická měření, následována CT skenerem a nejvyšších hodnot dosahují měření výpočtem pomocí gravimetrických měření hustot. Každá z těchto metod je citlivá pouze na určitý druh porozity a je třeba s nimi pracovat v kontextu finálního zpracování daného kompozitu.



Obr. 4.4 a) schematický postup měření veličin pro výpočet porozity gravimetrickou metodou; b) vyhodnocení porozity pomocí různých metod – De Kergariou [226].

U vzorků vyrobených v kap 4.1.1 byl proveden výpočet a měření jednotlivých komponent, přičemž měření prepregových tkanin nebylo možné z hlediska jejich prosycení pryskyřicí. Tato by šla vymýt pomocí rozpouštědla na bázi acetonu, ale došlo by i k ovlivnění vláken a zůstatku reziduí. Pryskyřice LG 700 po vytvrzení, byla měřena gravimetricky v destilované vodě. Hodnota hustoty byla naměřena $1,15 \text{ g/cm}^3$. Tkaniny byly měřeny stejným způsobem a výsledky srovnány s literaturou. Výsledné hodnoty lze nalézt v tabulce 4.7. Jsou zde vybrány hodnoty pro vzorky vyrobené infuzí - uhlíkový vzorek I-C01, jako referenční kompozit, dále pro hybridní I-CF04 a lněné vzorky I-F-T1, vzorky vyrobené z autoklávu byly využity všechny z tab. 4.5.

Tab. 4.7 Výpočet objemových podílů vláken, matrice a pórovitosti pro dané vzorky.

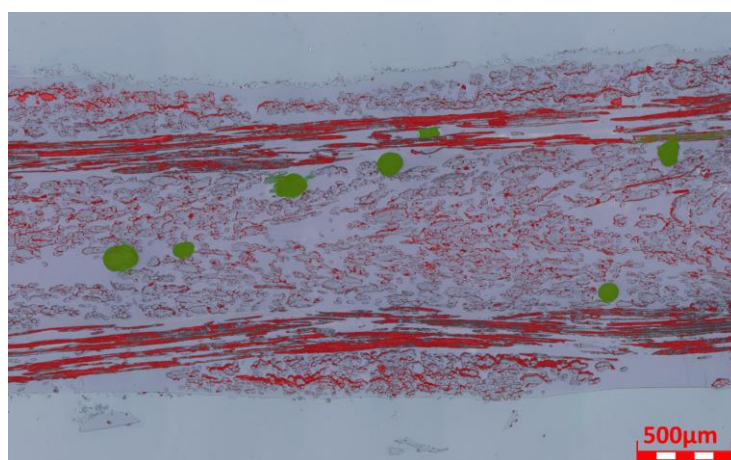
	Tloušťka [mm]	Uhlík N vr. [-]	Len N vr. [-]	Vf [%]	Vm [%]	Vp [%]
I-C01	2,02	8	0	42,30	55,23	2,48
I-CF04	1,48	4	1	30,34	62,60	7,05
I-F-T1	3,50	0	8	28,16	59,71	12,12
A-F-A	2,60	0	4	46,24	46,24	4,01
A-F-B	5,40	0	8	49,85	49,85	2,33
A-CF-C	1,90	4	1	45,64	51,13	3,22
A-CF-D	2,60	4	2	45,77	50,25	4,11

Z tabulky 4.7 je patrné že pro lamináty obsahující len je vždy obsažena pórovitost, je to dáno již mikropórovitostí samotné tkaniny a nedostatky měření její hustoty, tato velikost vypočtené pórovitosti ovlivňuje nejvíce.

Světelná mikroskopie

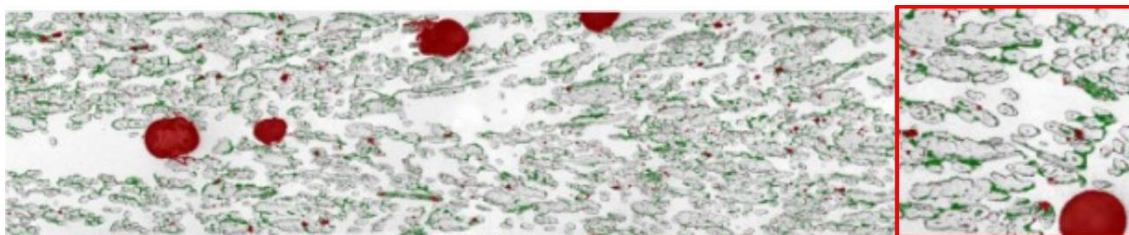
V případě hodnocení porozity a dalších vlastností kompozitů opticky, je třeba nejdříve připravit vzorek. Využívány jsou vzorky zalité ideálně do kontrastní pryskyřice, nebo materiály určené pro ty to účely. Důležitým parametrem při přípravě vzorku je nepřesáhnout teploty degradující jak pryskyřici, tak samotné lněné vlákno, tyto se pohybují dle použitých materiálů od 70 do 100 °C. V rámci přípravy vzorku je také nutné vynechat broušení pod vodou finálních vrstev, kdy materiál může nasáknout vlhkost a vlákna mění svůj objem. Při leštění na sucho je třeba také kontrolovat teplotu vzorku.

Jako vzorový byl zvolen vzorek F04 vytvořený infuzí, kde je dobře patrná pórovitost. Vybroušený vzorek s lněnými vlákny je uveden na obrázku 4.5. Je zde patrné i detailní přiblížení na strukturu vlákna, kdy lze ve středu každého vlákna pozorovat lumen – dutinu, tato tvoří přirozenou porozitu materiálů, jak již bylo uvedeno výše. Tato je také dobře patrná při řezu vláken v podélném směru, kdy se tato porozita jeví jako dlouhá vlákna. Tyto podélné řezy lumenu poté zkreslují výpočty porozity v řezu, tento jev se násobí i drobením a vypadnutím celého vlákna v průběhu výbrusu. Na tento jev je třeba brát ohled při hodnocení porozity. Měření byla zpracována v programech ImageJ a MIPAR. V případě obrazové analýzy pórovitosti se vychází z kontrastu jednotlivých oblast, stupně šedi (RGB barev) a nastavení prahových hodnot. Na obr 4.6 je vidět nastavení prahové hodnoty pro celý řez kde se nachází jak příčná, tak podélná vlákna. V tomto případě je vybrána i oblast příčných vláken, což zkreslí výpočet. Zelené oblasti makro-pórovitosti jsou zde vybrány ručně.



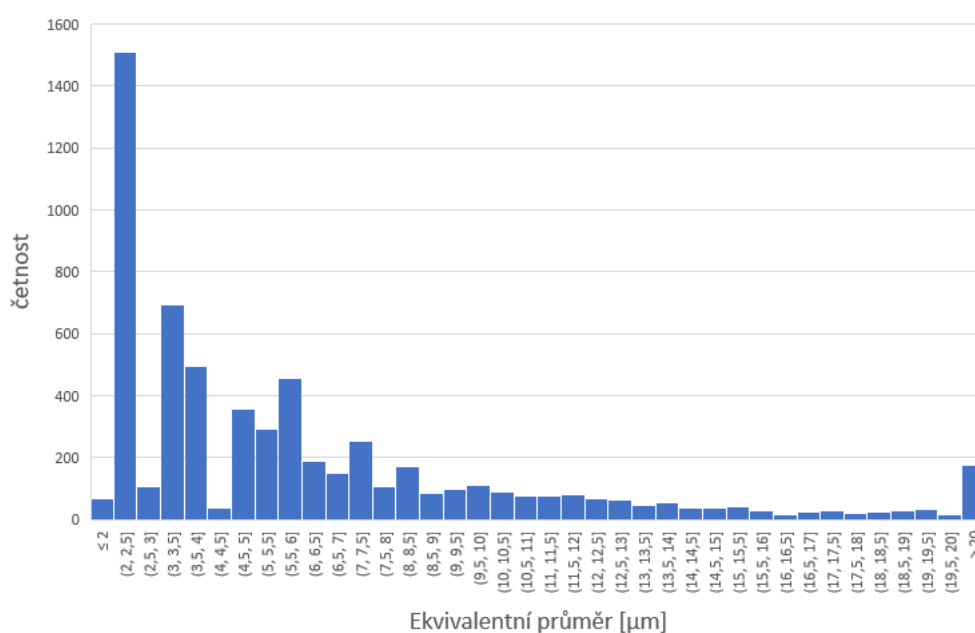
Obr. 4.5 Nastavení prahové hodnoty k vyhledání pórovitosti.

V případě ořezu oblasti od příčných vláken je software již schopen označit pomocí prahové hodnoty pouze pórovitost. Na obrázku 4.5 je znázorněno barevné rozlišení pórovitosti – zeleně a červeně póry, kterým odpovídá hodnota kruhovitosti do 0,5. Zde je patrné, že díky rozlišení již není vybrán lumen, ale pouze pórovitost na hranici vláken.



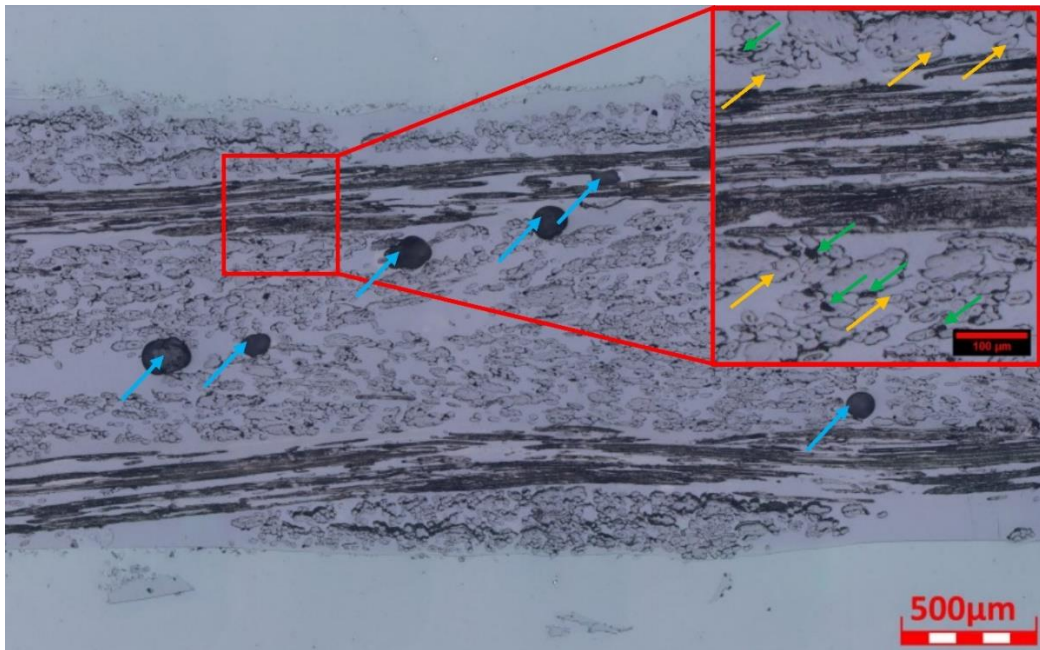
Obr. 4.6 Nastavená prahová hodnota pro oříznutý obrázek.

Histogram ekvivalentního průměru pórů je zobrazen na obrázku 4.7. Ekvivalentní průměr je teoretická přepočtená hodnota plošné velikosti identifikovaného póru. Velikost jednotlivých intervalů a četnost je také ovlivněna tvarem jednotlivých pórů a na nejnižších hodnotách daných rozlišením snímku a nastavením prahových hodnot, kdy oblasti pod 3 px nejsou vyhledávány.



Obr. 4.7 Histogram ekvivalentního průměru pórů lněného vzorku I-F04.

Na obr. 4.8 je pórovitost uvnitř lumenu menší než $2 \pm 0,5 \mu\text{m}$, označena oranžovými šipkami, pórovitost na rozhraní vláken zapříčiněna 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. Makro-pórovitost v pryskyřici je zobrazena modrými šipkami, zde je velikost ovlivněna mnoha faktory, pohybuje se od 50 do 300 μm , tvarem jsou tyto póry kulovitěho tvaru.



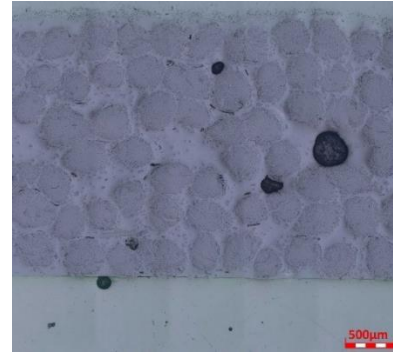
Obr. 4.8 Řez lněným laminátem.

Na obr. 4.9 lze porovnat všechny vzorky vyrobené jak infuzí, tak autoklávem. Je zřejmé, že u vzorků vyrobených v autoklávu dochází k větší kompaktnosti vláken což je dáno tlakem zpracování, který byl 6 Bar. Jsou zde vidět jen místní shluky pryskyřice, nejčastěji na rozhraní jednotlivých rowingů z kterých je tkanina utkána. U autoklávových vzorků také není patrná makroporovitost v pryskyřici a vyskytuje se pouze na hranicích vláken. U vzorku A a B (pouze len) je patrná reakce pryskyřice s vláknem a na řezu se může jevit jako pórovitost, tento jev může souviset se změnou vlastností hranic vláken vlivem zvýšené teploty vytvrzování – 120 °C. U hybridních materiálů A-CF-C a A-CF-D, není také patrná pórovitost pryskyřice, ale také je zde menší míra kompaktnosti lněných vrstev, kde je patrný vyšší podíl pryskyřice. Je to dáno vnějšími vrstvami uhlíkové tkaniny, která rozkládá tlak a nedovoluje přebytečné pryskyřici se dostat mimo lněnou tkaninu. I zde lze pozorovat problematickou oblast podélných řezů vláken.

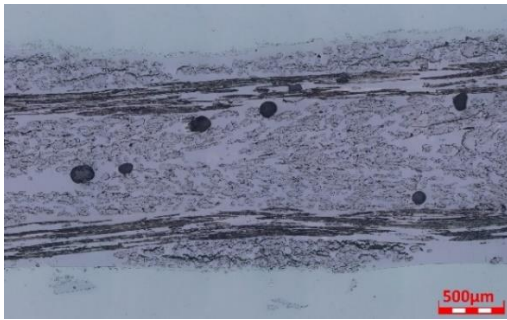
V tabulce 4.8 lze nalézt hodnoty pórovitosti pro jednotlivé vzorky uvedené na obr. 4.9. Jsou zde uvedené dvě hodnoty – automaticky vypočtení software MIPAR Image processor pro úlohu automatické hledání pórovitosti (templates/porosity) a manuálně určená hodnota pro oblasti s kolmými vlákny. U hybridních vzorků s uhlíkovými vlákny se tyto oblasti vláken při šikmém a podélném řezu zobrazují jako kontrastní až přesvětlené, při kolmém směru jako tmavá což software rozpoznává jako porozitu, proto je nutné tyto vlákna ručně vymazat z označení.



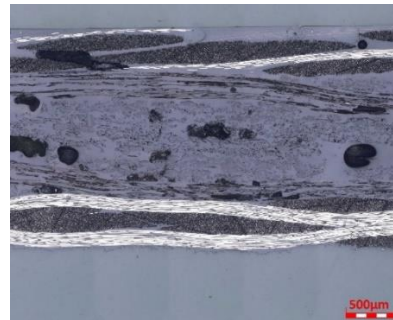
I-C01



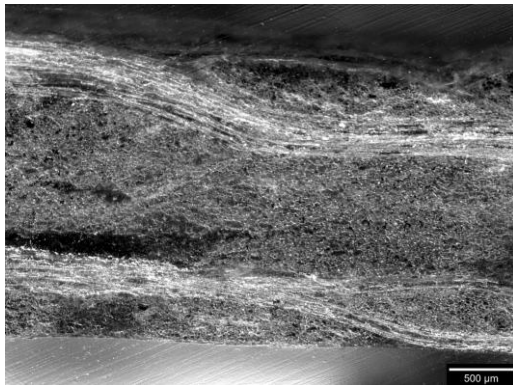
I-F-UD



I-F-T1



I-CF04



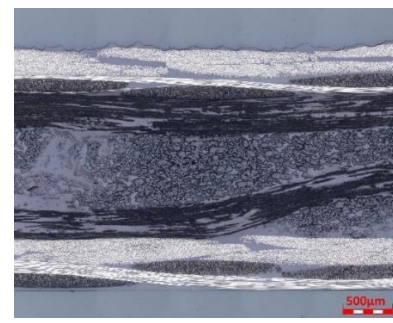
A-F-A



A-F-B



A-CF-C



A-CF-D

Obr. 4.9 Řezy jednotlivých vzorků.

Tab. 4.8 Pórovitost měřená optickou metodou.

	Tloušťka [mm]	Uhlík N vr. [-]	Len N vr. [-]	Vp a [%]	Vp m [%]
I-C01	2,02	8	0	0	0
I-CF04	1,48	4	1	0,43	5,37
I-F-T1	3,50	0	8	9,14	5,24
A-F-A	2,60	0	4	10,81	0,5
A-F-B	5,40	0	8	0,96	0,12
A-CF-C	1,90	4	1	0,73	0,95
A-CF-D	2,60	4	2	0,33	1,24

CT měření

Dalším způsobem pro měření pórovitosti vzorků byla zvolena metoda počítačové tomografie (CT), její popis je uveden v kapitole 3.7.6. Byly provedeny dvě měření jedno s nižším rozlišení na zařízení Phoenix V|tome|x M300 a druhé s vyšším rozlišení pro vzorky s nízkou porozitou na zařízení GE phoenix v|tome|x L240 v laboratoři Rentgenové výpočetní mikro a nano tomografie výzkumného centra CEITEC VUT v Brně. Tento přístroj je jediné zařízení svého druhu v České republice, a to z důvodu jeho odlišnosti od ostatních průmyslových přístrojů. Standartní přístroje CT mají detektor ve fixní pozici (vzdálenost i poloha), systém GE phoenix v|tome|x L240 umožňuje pohyb detektoru ve všech osách. Přístroj tak může dosáhnout lepšího rozlišení díky oddálení detektoru (tj. větší geometrické zvětšení), nebo pohybu detektoru v osách X a Y (tj. virtuální zvětšení plochy detektoru při zachování rozlišení dat). Dále je přístroj osazen novou generací detektoru s velikostí pixelů 100 μm , zatímco běžný průmyslový standard je 200 μm . V praxi tak lze ve srovnání s dosavadní průmyslovou praxí při stejné vzdálenosti komponent dosáhnout dvojnásobného rozlišení, respektive dosáhnout stejného rozlišení pro vzorek o dvojnásobné velikosti. Pro snímání menších vzorků s rozlišením v jednotkách $\mu\text{m}/\text{voxel}$ je velkou výhodou také nano-fokusační trubice (180 kV), která umožňuje dosáhnout rozlišení až 1 $\mu\text{m}/\text{voxel}$ při relativně vysokém výkonu trubice, který by u rozšířenější mikro-fokusační technologie měl za následek neostrost výsledných tomografických dat vlivem příliš velké ohniskové stopy. Tomografická měření vzorků byla prováděna při teplotě 21 °C. Měření bylo provedeno s nano-fokusační trubicí s nastavením energií 70 kV a 350 μA , s rozlišením 15 μm na voxel, se zájmovou oblastí v přibližné délce 4 cm, z důvodu zlepšení rozlišení. S časem měření 1 hodina první měření probíhala na CT přístroji Phoenix V|tome|x M300 v laboratoři Rentgenové výpočetní mikro a nano tomografie výzkumného centra CEITEC VUT v Brně. Tomografická měření vzorků byla prováděna při teplotě 21 °C. Měření bylo provedeno s mikro-fokusační trubicí s nastavením energií 200 kV a 90 μA , s rozlišením 46 μm na voxel, toto rozlišení bylo kalibrováno. Se zájmovou oblastí celého vzorku. S časem měření 1 hodina, napětí (kV) proud (μA) timing filtr rozlišení (μm) binning 200 90 200 0,5 mm - Cu 46 1 Přístroj má pevnou vzdálenost mezi detektorem a RTG-trubicí 800 mm (změna voxel-size pouze změnou vzdáleností od trubice – čím blíže k trubicí tím nižší „lepší“ rozlišení). Starší generace detektoru 2016x2016 px.

Vzorky byly připraveny jako soubor více dílců, který byl vždy skenován současně a poté softwarově rozřezán na dílčí vzorky, to vedlo ke zkrácení strojního času a redukci výsledných dat po ořezu. Na provedených vzorcích byla provedena analýza pórovitosti v sw myVGL 2023.4. Výsledky lze nalézt na obrázku 4.10, kde je reprezentována porozita v závislosti na velikosti jednotlivých pórů. V rámci vyhodnocení je limitním faktorem pro rozpoznání defektu (póru) přepočtená hodnota velikosti voxelu. Tato bývá mezi hodnotou 2-6 a je závislá na těchto faktorech, jako jsou například ostrost skenu (un/sharpness počet voxelů na přechodu mezi vzduchem a materiálem), materiálem dutiny (zda je dutina tvořena vzduchem či jen výrazným

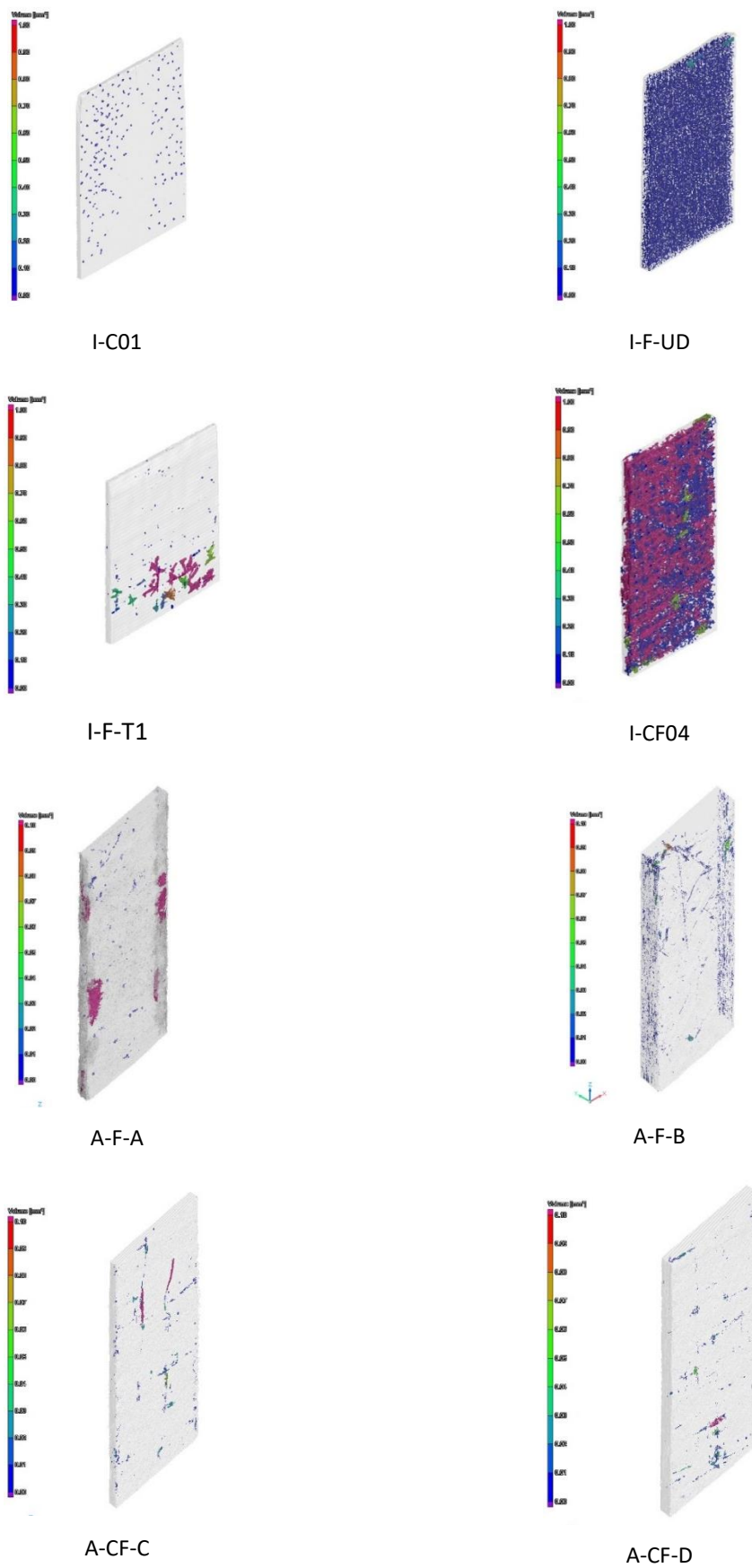
poklesem hustoty), poměr kontrastu (vzduch/materiál). Nedá se přesně říct od jaké velikosti voxelu bude možné defekt 100 % detekovat, vždy pouze přibližně. Pro skeny hybridních materiálů a vzorků na infuzi je tato hodnota 69-138 μm a pro skeny autoklávových vzorků od 22,5 - 45 μm .

Naměřené hodnoty lze nalézt v tab. 4.9, jedná se o procentuální hodnotu všech naměřených dutin z celého objemu vzorku.

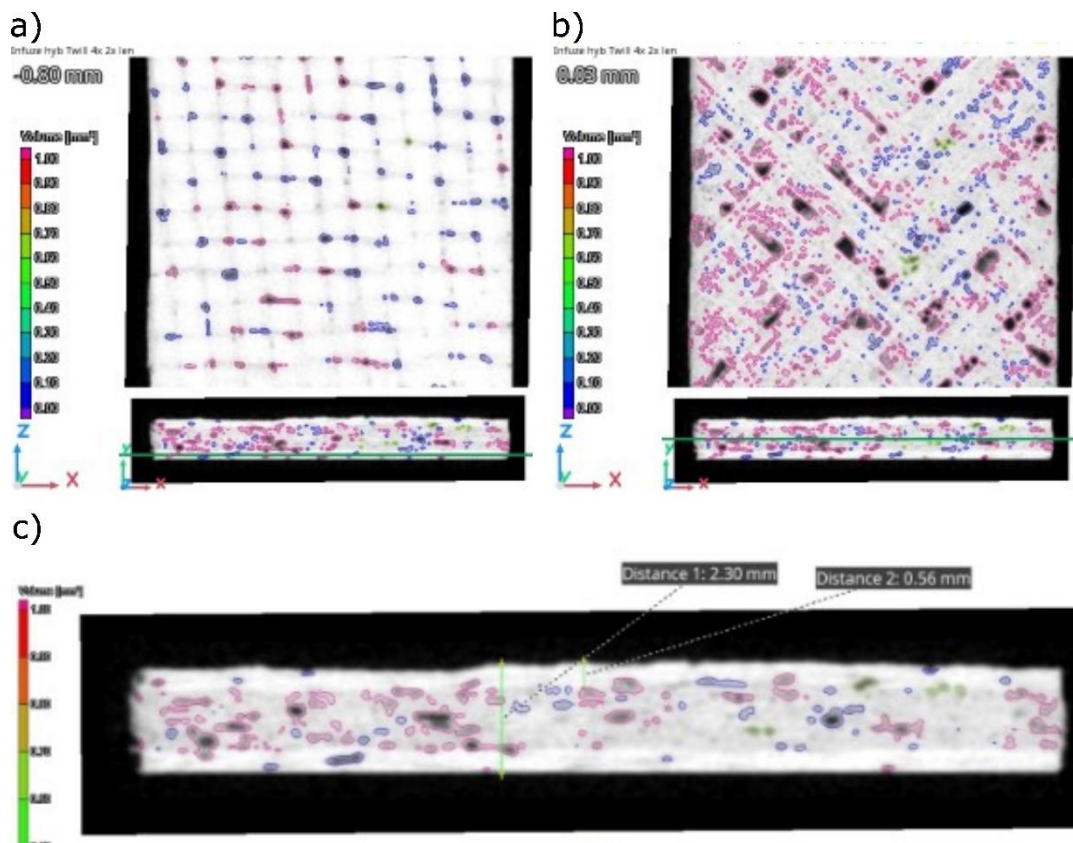
Tab. 4.9 Procentuální hodnoty všech naměřených dutin z celého objemu vzorku.

	Tloušťka [mm]	Uhlík N vr. [-]	Len N vr. [-]	Vp ct [%]
I-C01	2,02	8	0	0,29
I-CF04	1,48	4	1	13,15
I-F-T1	3,50	0	8	0,88
A-F-A	2,60	0	4	0,13
A-F-B	5,40	0	8	0,06
A-CF-C	1,90	4	1	0,08
A-CF-D	2,60	4	2	0,05

Nejnižší míru porozity mají autoklávové vzorky A-F-A až A-CF-D, kde měřením na zařízení Phoenix V byla vyhodnocena nulová porozita díky nízkému rozlišení. Na vzorcích je dobře vidět pórovitost vzniklá delaminací při řezání vzorku, tato byla softwarově uzavřena. Její hodnota ale hraje zanedbatelnou roli a lze ji dobře filtrovat díky její velikosti. Nízkou makropórovitost také obsahují vzorky I-C01(uhlíková vlákna) a I-F-T1 (len) což potvrzuje správně provedenou techniku infuze. Nejvyšší pórovitost se vyskytuje u hybridního kompozitu vyrobeného infuzí I-CF04, pro ověření byl proveden sken i vzorku vyrobeném v jiné výrobní dávce ze stejných materiálů, zde byla naměřena pórovitost 8,6 %. Pórovitost I-CF04 je detailně hodnocena na obr 4.11, kde je patrné že většina pórovitosti je uvnitř lněné výplně – obr. 4.11a, která je uzavřena uhlíkem, viz obr. 4.11b), některé póry se také vyskytují v uhlíku i lnu na rozhraní osnovy a útku u lnu je to velmi dobře patrné a je to způsobeno špatným způsobem tkaní, kdy v látce jsou mezery pro dodržení plošné hustoty materiálu 200 g/m^2 .

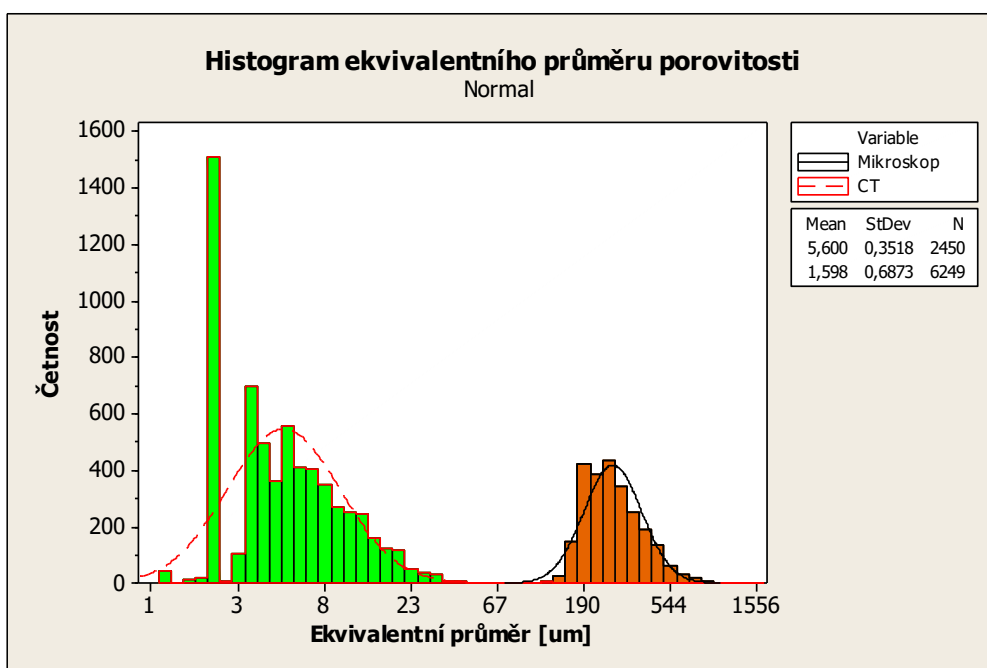


Obr 4.10 Vizualizovaný objem dutin v testovaných kompozitech.



Obr. 4.11 Vzorek I-CF04 – hybridní a) řez uhlíkem, b) řez lnem, c) detail řezu.

Porovnání metod optické a CT je zobrazeno na obrázku 4.12, kde je zobrazen histogram ekvivalentního průměru póru v závislosti na četnosti výskytu v materiálu pro 2D vzorek opticky měřený – četnost zelenou barvou a pro metodu CT četnost oranžově. Z grafu je dobře viditelné že obě metody nelze považovat za rovnocenné pro vyhodnocení pórovitosti. Je to dáno zejména rozlišením CT metody a dále rozložením pórovitosti ve vzorku, kdy náhodný řez bude ovlivňovat výsledek, nebo bychom potřebovali mnoho řezů – desítky a statistické vyhodnocení. V tab. 4.10 je uvedeno porovnání využitých metod a jejich výsledků nejnižších hodnot dosahovala metoda optického mikroskopu, dále metoda CT a nejvyšší hodnoty jsou dosaženy pomocí výpočtu s pomocí hustot materiálů. Rozdílů pro jednotlivé materiály jsou úměrné pro všechny metody. Pro materiály, které obsahují len vyrobené v autoklávu je rozdíl v pórovitosti výpočtem shodný a to o 3-4 %. Tato nepřesnost je způsobena převodem plošné hustoty materiálu na objemovou. Největších rozdílů dosahuje čistě lněný vzorek F04 vyrobený infuzí, který také výpočtově obsahuje nejmenší objemový podíl vláken, na vzorku CT (obr. 4.11) je také dobře patrné rozvrstvení pórovitosti ve vzorku a tato bude mít souvislost s danou metodou hodnocení hustot, velikostí vzorku a velikostí samotných pórů.



Obr. 4.12 Histogram pórovitosti vzorku I-CF04 – metodou optickou a CT.

Tab. 4.10 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

Dílčí závěry

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-pórovitost. Tyto měření jsou ovlivněna i lidským faktorem, který je přítomen při softwarovém zpracování měření. Jedna z dalších využitelných metod je rtuťová porozimetrie, díky které lze zjistit distribuci velikosti pórů a jejich relativní velikost, tato všem 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.

4.1.3 Mechanické vlastnosti KPV - pevnost

Z hlediska pevnosti se přistoupilo ke dvěma hlavním testům a to test pevnosti v tahu a test pevnosti trojbodým ohybem. Měření pevnosti v tahu bylo provedeno pomocí měřicího stroje ZwickRoel Z100 podle normy EN ISO 527-4 (hlavní parametry a rozměry vzorku odpovídaly normě) [227]. Vzorky byly široké 25 mm, dlouhé 210 mm a tlusté 1,05 mm a byly upevněny v samosvorných čelistech pomocí přílozek ze skelného kompozitu a epoxidového lepidla. V každé měřicí sérii bylo změřeno pět vzorků. Rychlost zatěžování byla nastavena na 2 mm/min.

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 [228] [229] [230].

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

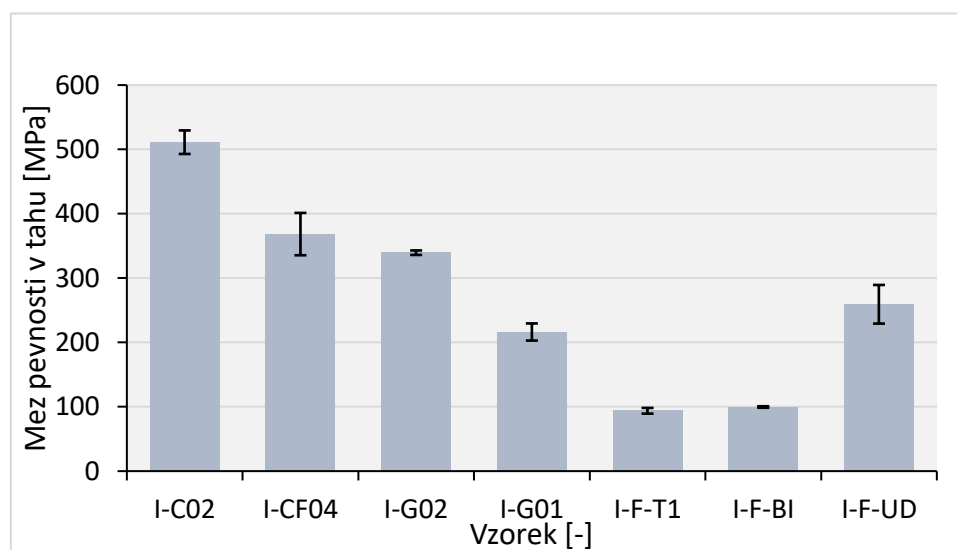
Zkouška tahem infuzních materiálů

Výsledky tahových zkoušek jsou shrnuty v tab. 4.11. Parametry tahového modulu, pevnosti v tahu a poměrné deformace byly dále vypočteny ze záznamů tahových zkoušek. Konečné hodnoty jsou aritmetickým průměrem hodnot získaných z pěti vzorků. Kompozitní materiál I-C02-uhlík vykázal nejvyšší hodnoty jak tahového modulu, tak pevnosti. Hybridní materiál také měl velmi příznivé vlastnosti a vykazoval vyšší hodnoty než skleněné a čistě lněné materiály. Pevnost v tahu pro všechny vzorky je znázorněna na obr. 4.13, zatímco srovnání tahových modulů je ukázáno na obr. 4.14. Z obrázku 4.13 je zřejmé, že lněný kompozit vykazoval výrazně nižší vlastnosti než sklo pro oba materiály – kepr (Twill) a biaxiální. Obecně keprový materiál vykazoval nižší hodnoty jak tahového modulu, tak pevnosti než biaxiální materiál. Ve srovnání s jednosměrným materiálem len s vlákny ve směru působící síly dosáhla keprová skleněná tkanina horších vlastností. Co se týče tahového modulu (obr. 4.14), tkaniny a biaxiální typy jak lněného, tak skleněného kompozitu vykazovaly minimální rozdíly. Měrná pevnost definovaná jako mez pevnosti v tahu vůči hustotě daného materiálu je také uvedena v tab. 4.11. Lněné materiály dosahují nejnižších hodnot až na UD materiál, který dokonce překonává skleněné materiály. Tkaniny tkané kepr (Twill) dosahují nižších hodnot.

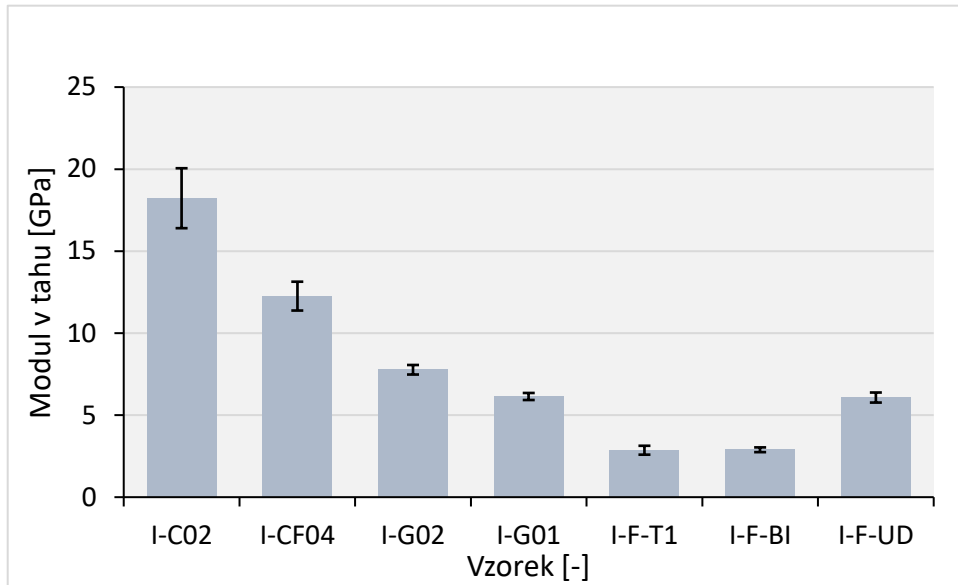
Nicméně rozdíly jsou více patrné z obr. 4.15, který ukazuje grafické znázornění výsledků tahových testů, tj. křivky napětí-deformace, z nichž byly odvozeny tahové moduly. U skleněných materiálů byla pevnost v tahu vyšší pro biaxiální tkaninu, ale tvary a sklony křivek odhalily, že jejich tahové moduly byly srovnatelné. Tento jev je dobře popsán v literatuře a je typický pro kompozitní materiály, jejichž hodnota tahového modulu není bez znalosti tvaru křivky napětí-deformace zcela smysluplná. Například Zhang [230] zdokumentoval takové mechanické chování pro hybridní materiály sklo–len. Co se týče ostatních materiálů, výsledky pro uhlíkový kompozit a hybridy dosahovaly nejvyšších hodnot napětí, zatímco nejnižší hodnoty byly dosaženy pro len (všimněte si, že průběhu křivek zatížení pro tkaninu a biaxiální materiály, byly téměř identické). Hodnoty deformace byly primárně dány složením vzorků, které bylo kvazi-izotropní. Proto byla deformace vyšších hodnot pro jednosměrné vzorky nebo vzorky uspořádané v ideálních směrech. Všechny hodnocené vzorky prošly konečným lomem, jak je vidět z křivek na obr. 4.15.

Tab. 4.11 Mechanické vlastnosti testovaných vzorků získané z tahových zkoušek.

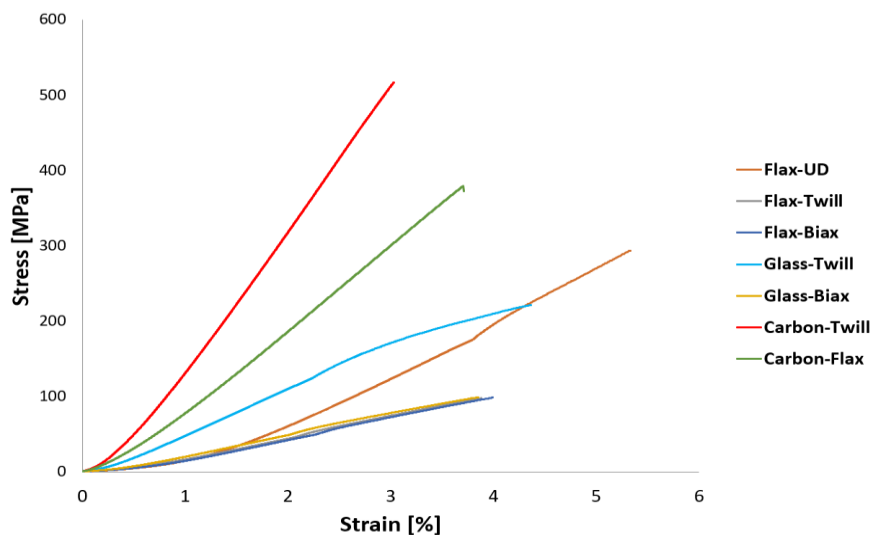
Vzorek	Vzor	Modul v tahu [GPa]	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Max. přetvoření [%]	Měrná pevnost [MPa/kgm ⁻³]
I-C02	Twill 2/2	18,21 ± 1,83	511,26 ± 18,31	2,8 ± 0,22	0,37
I-CF04	Twill 2/2	12,24 ± 0,88	368,44 ± 32,90	2,96 ± 0,34	0,28
I-G02	Bi-axial	7,77 ± 0,29	339,24 ± 13,33	4,60 ± 0,18	0,19
I-G01	Twill	6,14 ± 0,21	216,22 ± 3,51	4,03 ± 0,28	0,13
I-F-T1	Twill	2,86 ± 0,27	93,87 ± 4,44	3,34 ± 0,31	0,09
I-F-BI	Bi-axial	2,89 ± 0,15	99,9 ± 1,15	3,57 ± 0,09	0,09
I-F-UD	UD	6,07 ± 0,31	259,12 ± 30,04	4,21 ± 0,24	0,21



Obr. 4.13 Mez pevnosti v tahu pro jednotlivé vzorky.



Obr. 4.14 Modul v tahu pro jednotlivé vzorky.



Obr. 4.15 Výsledky tahových testů, křivky závislosti napětí na deformaci pro jednotlivé vzorky [186].

Hodnoty pevnosti v tahu a modulu uvedené v dostupné literatuře se mohou výrazně lišit v závislosti na typu použité tkaniny, epoxidové pryskyřici a výrobní metodě [231]. Výsledky tahových zkoušek zde získané pro hybridní a lněný kompozit lze srovnat s těmi, které uvedli Fairlie a kol. [232] a Al-Hajaj [233], kteří hodnotili hybridní kompozit, čistý uhlík a len. Složení testovaných vzorků bylo srovnatelné a rozdíly v pevnosti v tahu byly v rámci standardní odchylky. Tahový modul byl vyšší u základních vzorků, což lze připsat různému složení tkaniny v jednotlivých vrstvách. Al-Hajaj [233] studoval lněnou tkaninu ve formě UD s vrstvosvácením 0/90 nebo $\pm 45^\circ$ a prezentoval rozdílné výsledky pro různé směry vrstvosvácení lněné tkaniny uvnitř kompozitů. Ve srovnání se zde prezentovanou kvazi-symetrickou lněnou tkaninou byly hodnoty jak pevnosti v tahu, tak modulu vyšší pro směr vrstvosvácení 0/90

a srovnatelné, nebo nižší pro směr vrstvení $\pm 45^\circ$. To lze připsat použití UD tkanin namísto keprových. Výsledky získané pro lněnou tkaninu lze dále srovnat se studii [234] [235] [236].

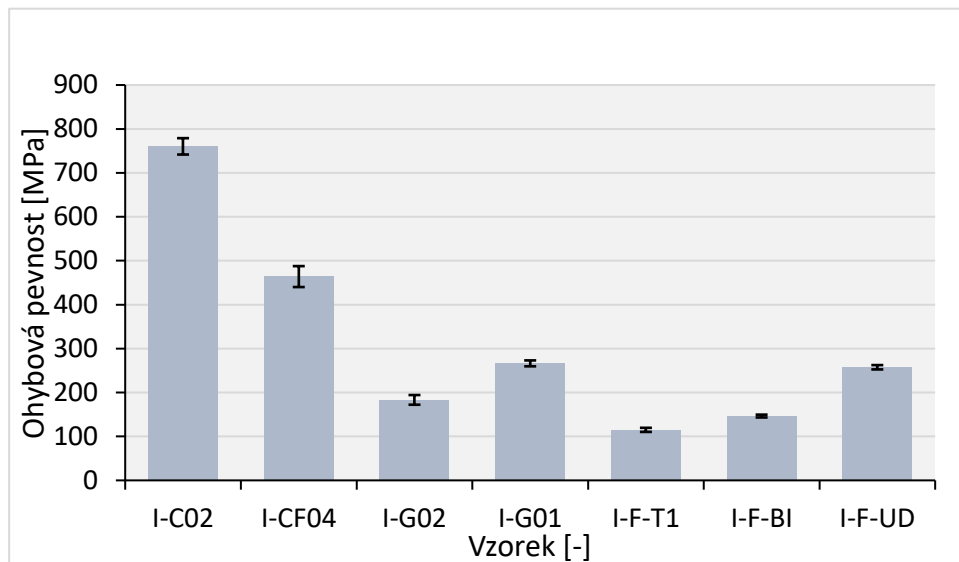
Zkouška tří bodovým ohybem infuzních materiálů

Ohybové testy byly měřeny podle normy EN-ISO 14125: 1999 [227] s pomocí stejného zařízení ZwickRoel Z100 s použitím reverzního a nastavitelného přípravku. Délka vzorků odpovídala normě podle tloušťky a vzdálenosti podpěr; šířka vzorků byla 15 mm. Pro každý materiál bylo opět změřeno pět vzorků. Měřicí přípravek umožňoval změnit vzdálenost podpěr podle normy, takže mohly být měřeny vzorky s různými tloušťkami (různími se podle výrobní metody). Rychlost zatěžování byla nastavena na 2 mm/min.

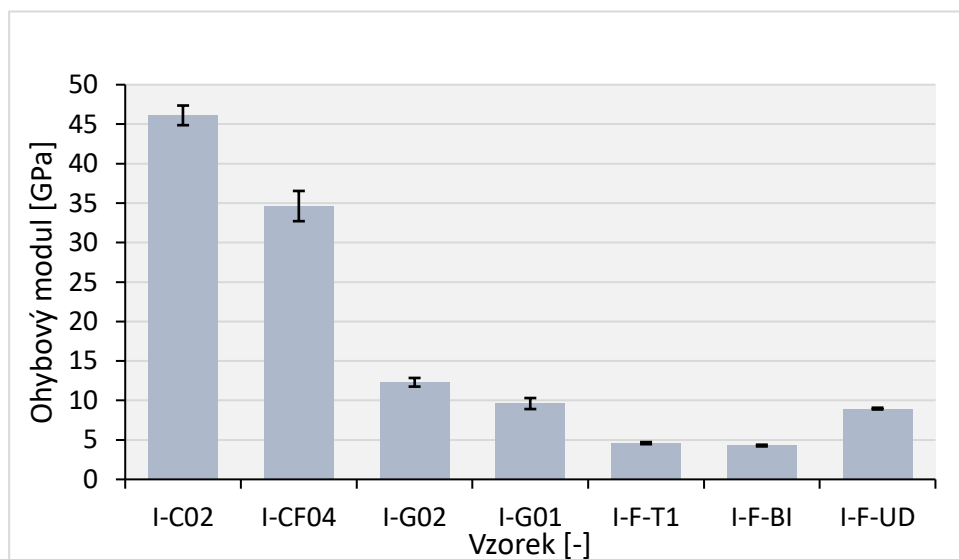
Hodnoty získané na základě tříbodového ohybového testu, tj. ohybový modul, ohybová pevnost a ohybová deformace, jsou uvedeny v tab. 4.12. Hodnoty jsou opět aritmetické průměry z pěti vzorků se standardní odchylkou $N = 5$. Podobně jako výsledky tahových testů, uhlíkový vzorek spolu s hybridním vykazoval nejvyšší hodnoty. Nicméně mezi hybridními a skleněnými vzorky byly rozdíly. Hodnoty pro hybridní vzorek odpovídaly těm získaným pro uhlíkové, zatímco hodnoty pro sklo dosáhly podobných hodnot jako pro len (viz obr. 4.16 znázorňující ohybové pevnosti a obr. 4.17 ukazující ohybové moduly). Výsledky tříbodového ohybového testování ukazují, že skleněná tkanina vykazovala velmi nízkou ohybovou pevnost – 183 MPa vs 760 MPa dosaženými pro uhlík a 463 MPa dosaženými pro hybridní tkaninu, resp. Trend byl podobný i pro ohybový modul – 12,30 MPa pro sklo, 46,12 MPa pro uhlík a 34,63 MPa pro hybridní uhlík–len, resp. Podobné hodnoty pro srovnatelné materiály uvedli i jiní [231] [230] [237]. Srovnání výsledků také ukazuje, že ohybová pevnost a moduly získané pro len UD byly srovnatelné s těmi získanými pro dvouosou skleněnou tkaninu. Měrná pevnost prokázala, že lněné materiály dosahují lepších hodnot než skleněné.

Tab. 4.12 Hodnoty získané na základě tříbodového ohybového testu.

Vzorek	Vzor	Ohybový modul [GPa]	Ohybová pevnost [MPa]	Ohybová deformace [%]	Měrná pevnost [MPa/kgm ⁻³]
I-C02	Twill 2/2	46,12 ± 1,24	760,38 ± 18,64	2,01 ± 0,10	0,54
I-CF04	Twill 2/2	34,63 ± 1,91	463,94 ± 23,86	1,58 ± 0,05	0,35
I-G02	Twill	12,30 ± 0,55	183,24 ± 11,01	2,49 ± 0,14	0,10
I-G01	Bi-axial	9,61 ± 0,70	266,41 ± 6,71	3,10 ± 0,67	0,17
I-F-T1	Twill	4,59 ± 0,13	115,01 ± 4,64	3,08 ± 0,26	0,10
I-F-BI	Bi-axial	4,28 ± 0,11	146,43 ± 3,21	3,94 ± 0,39	0,12
I-F-UD	UD	8,96 ± 0,11	257,50 ± 4,91	3,15 ± 0,06	0,21



Obr. 4.16 Graf znázorňující ohybové pevnosti testovaných vzorků.

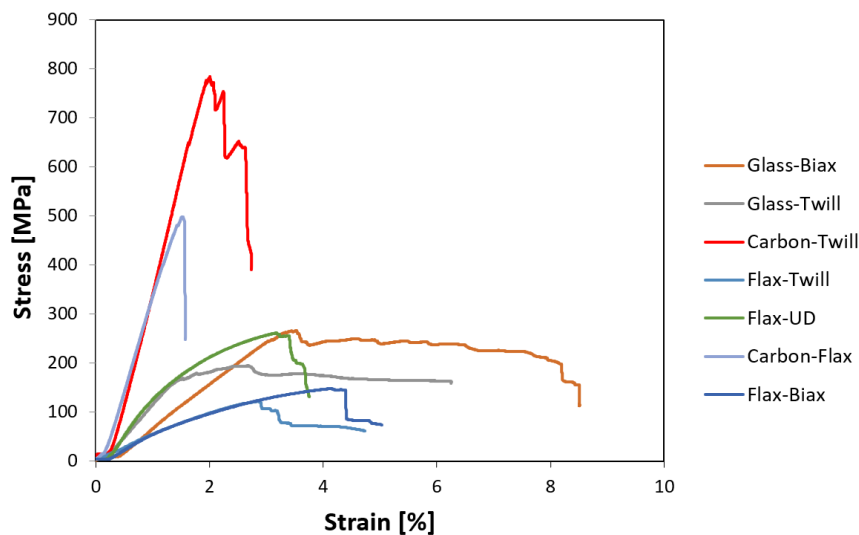


Obr. 4.17 Graf znázorňující ohybové moduly testovaných vzorků.

Z ohybových křivek napětí-deformace znázorněných na obr. 4.18 je zřejmé, že po dosažení maximálního ohybového napětí (síly) se vzorky dále deformovaly při nižších zatíženích, ale bez konečných lomů. Tento jev byl nejvýraznější u skleněných a lněných vzorků [238]. Pro každý vzorek byl test zastaven po ztrátě 30 % maximálně dosažené síly. Hodnoty ohybových modulů byly odvozeny z křivek – jev zmíněný výše zde byl také patrný; když ohybové napětí pro biaxiální skleněnou tkaninu dosáhlo vyšší hodnoty než pro skleněnou keprovou tkaninu, její hodnota ohybového modulu byla nižší, dána sklonem křivky získané pro nejvyšší dosažené napětí. Zajímavé chování bylo pozorováno u skleněných tkanin – hodnoty deformace odpovídající maximálním hodnotám napětí byly relativně vysoké, až přibližně 8 % (také pozorováno např. v [239]). Avšak takto vysoká namáhání již znamenají nevratné deformační změny v materiálu, a maximálně pozorovaná plasticita kompozitů tak není prakticky užitečná (typicky použitelná až do 2,5-3 % deformace). Pokud jde o srovnání

keprových a biaxiálních typů tkanin se stejným materiálem, průběhy křivek napětí-deformace byly podobné, viz obr. 4.18.

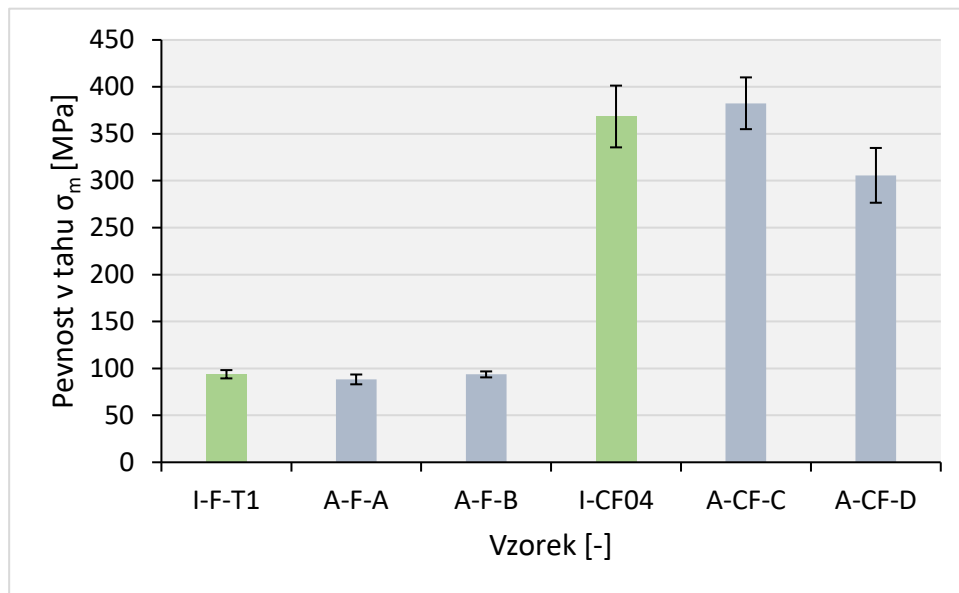
Uhlíkovo-lněné kompozity jsou někdy náchylné k degradaci matrice, což je běžné u kompozitů s přebytkem pryskyřice. Tento jev souvisí s křehkostí epoxidových pryskyřic, které mohou podstoupit pouze omezenou deformaci před selháním a mají tak nízkou nárazovou pevnost [237]. Navíc trhliny se rychle šíří od lněného jádra takového hybridního materiálu směrem k uhlíkovým vrstvám (které mají nižší frakci pryskyřice než lněné jádro) [230].



Obr. 4.18 Výsledky ohybových testů, křivky závislosti napětí na deformaci pro jednotlivé vzorky [186].

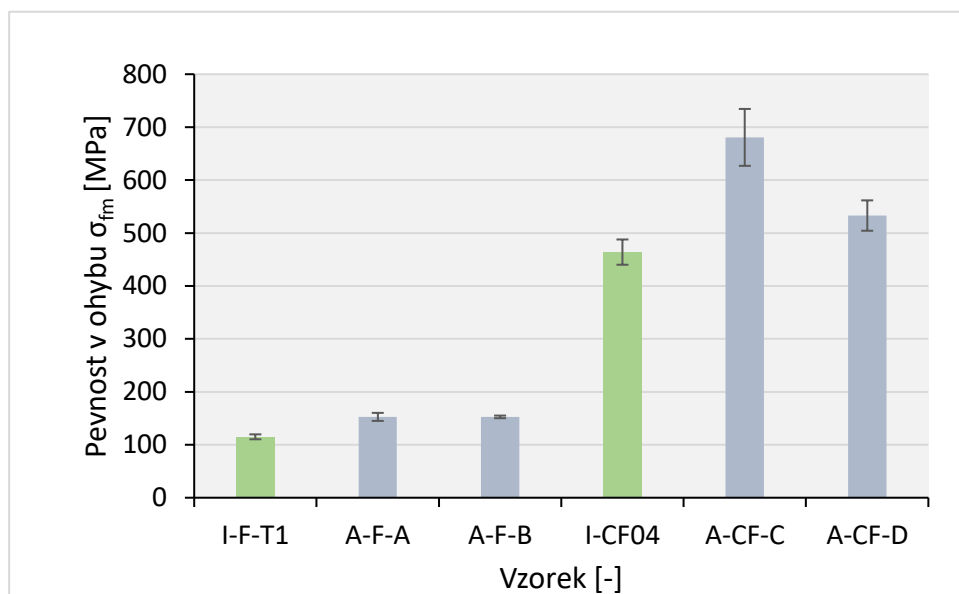
Porovnání výrobních metod

Po materiál lněný a hybridní bylo provedeno porovnání dvou výrobních metod, a to autoklávu a infuze pro vzorky s tkaninou typu kepr (twill). Na obrázku 4.19 jsou patrné hodnoty pro maximální napětí při přetržení vzorku, vzorky vyrobené infuzí 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, rozptyly již dosahují vyšších hodnot pro všechny vzorky.



Obr. 4.19 Porovnání jednotlivých výrobních metod z hlediska pevnosti v tahu.

Porovnání maximální pevnosti v ohybu je zobrazeno na obrázku 4.20, zde je patrné, že vzorky vyrobené v autoklávu dosahují vyšších hodnot než vzorky vyrobené infuzí, a to jak pro hybridní materiály, tak pro materiály čistě lněné. Zde se projevuje vyšší objemový podíl vláken a nižší pórovitost u autoklávkových vzorků. U této zkoušky je také už jistý vliv smykových vlastností materiálů.



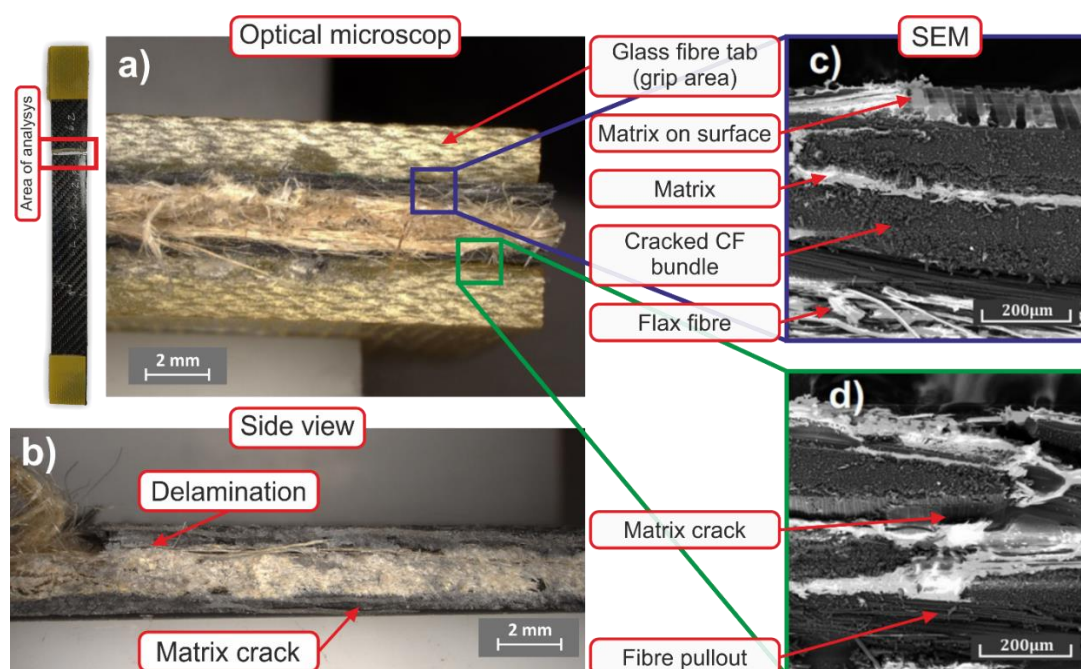
Obr. 4.20 Porovnání jednotlivých výrobních metod z hlediska pevnosti v ohybu.

Mikrostruktura lomu

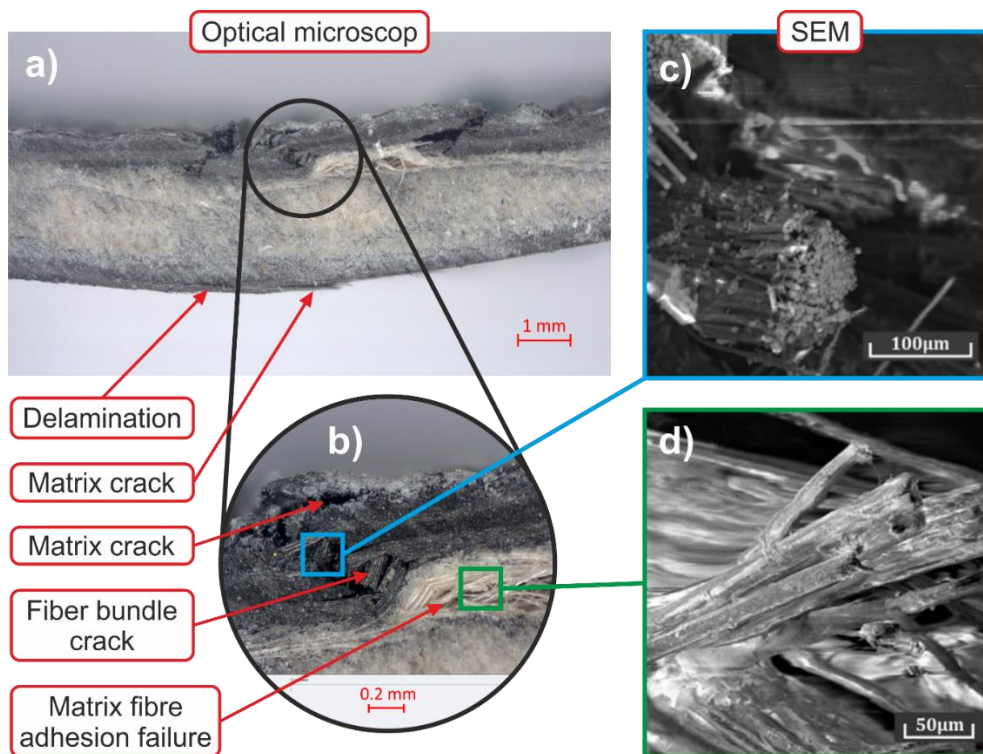
Mikrostruktura vláknově-hybridního vzorku a lomová plocha po zkušebním tahu jsou znázorněny na obr. 4.21. Horní pohled na lomovou plochu vzorku zobrazený na obrázku 4.21a také ukazuje příložky na obou koncích vzorku. Obrázky 4.21a a 4.21d zobrazují uhlíková vlákna oddělená od matrice, což ukazuje na mezi-laminární selhání a oddělení matrice od vláken při iniciaci trhliny [236]. Obr. 4.21b ukazuje boční plochu vzorku s viditelnou delaminací v mezi-vrstvě uhlíku a lnu. Na spodní straně vzorku je zřetelná trhлина v pryskyřici,

kteřá se šířívá podél hranic vláken. Obrázek 4.21c ukazuje rozhraní oblastí uhlíku a lnu. Jak je vidět, uhlíková vlákna nebyla oddělena od matrice a nedošlo k roztržení materiálu. Lze předpokládat, že vývoj trhliny primárně proběhl v mezi-laminárních oblastech uhlíku – na rozhraní pryskyřice a vláken – a šířil se směrem k oblasti lnu, ve které byla jednotlivá vlákna roztržena kvůli jejich větší velikosti a špatným vlastnostem rozhraní vlákno-matrice [240]. Výsledky odpovídají těm, které získali Dinesh a kol. [241], kteří dokumentovali špatnou přilnavost rozhraní a delaminaci u hybridního kompozitu z lnu a uhlíku při tahu, tlaku a během ohybu. Zvýšení obsahu lněných vláken podporuje výskyt lomu bez delaminace.

Lomová plocha po ohybu je znázorněna na obr. 4.22. Obrázek 4.22a zobrazuje oblast s delaminací a trhlinou matrice uhlíkových vláken, což ukazuje na výskyt tahového napětí na spodní straně vzorku. Na druhé straně, tlakové napětí nastává na vrchu vzorku (obrázek 4.22b) - jeho morfologie ukazující křehký lom svazku uhlíkových vláken, je detailně zobrazena na obrázku. 4.22c. Vzhledem k jejich zhoršené soudržnosti s matricí [236] byla lněná vlákna primárně poškozena delaminací a masivním selháním matrice s vlákny (zřetelné na obrázku 4.22d). Taková oddělená vlákna bylo možné pozorovat v celé lomové oblasti, jak je znázorněno na obr. 4.22b.



Obr. 4.21 Mikrostruktura prasklého vzorku z tahové zkoušky – optická mikroskopie a analýza SEM, a) pohled shora, b) boční pohled, c) SEM snímek lomové oblasti uhlík – len, d) SEM snímek svazku uhlíku – matrice [186].



Obr. 4.22 Mikrostruktura prasklého vzorku z ohybové zkoušky – optická mikroskopie a analýza SEM, a) boční pohled, b) detail oblasti tlakového napětí, c) SEM snímek svazku uhlíku, d) SEM snímek lněného vlákna [186].

Dílčí závěry

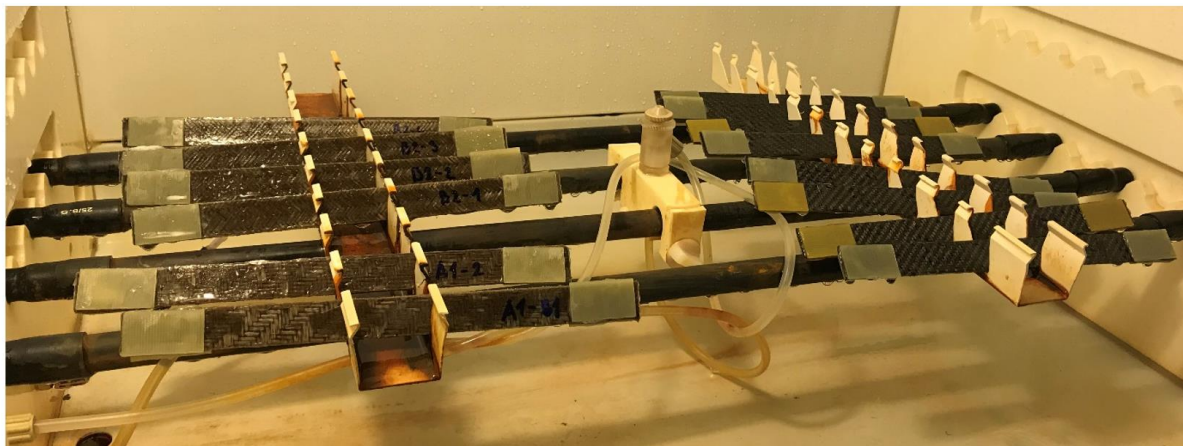
Z provedených testů je patrné že lněné lamináty dosahují nejmenších pevností z hodnocených vzorků, ale také dosahují nejmenší hustoty materiálu. V případě porovnání měrné pevnosti již materiál UD lněný dosahuje vyšších hodnot než materiály skelné Twill. Díky způsobu tkaní jsou lněné tkaniny s velmi volnou 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 blízcí se skelným tkaninám. V případě ohybových vlastností, které mohou být pro některé aplikace stěžejní se lněné materiály z hlediska měrné pevnosti se vyrovnají materiálům skelným. Směr hybridizace je ideálním 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.

4.1.4 Pevnostní testy po testu nasákavosti

Testy nasákavosti a mechanické vlastnosti

Samotné testování nasákavosti vody ve vlhku je definováno normou ISO 22836:2020, „Fibre-reinforced composites, Method for accelerated moisture absorption and supersaturated conditioning by moisture using sealed pressure vessel“. Tato norma definuje prostředí teplotu a velikost vzorku daného pro testování. V našem případě je tento přizpůsoben pro potřeby tahových a ohybových zkoušek a jejich těles a možností upnutí a zařízení. Pro vzorky vyrobené infuzí se přistoupilo k zjednodušené formě, u vzorků vyrobených v autoklávy byl měřen váhová přírůstek v čase.

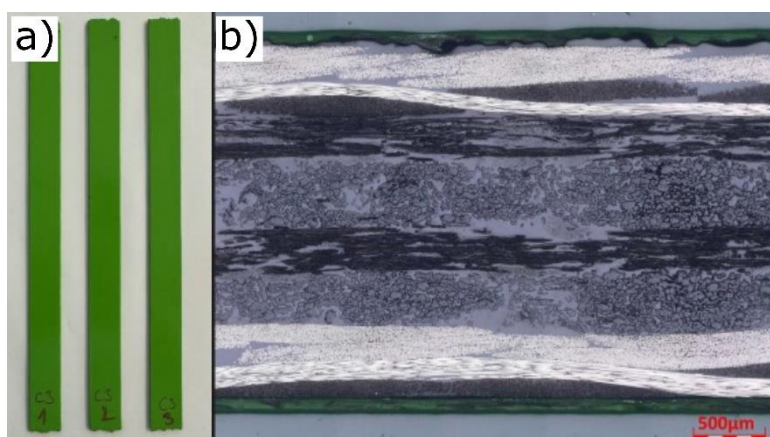
Pro testování ve vlhkém prostředí byly vzorky umístěny v klimatické komoře VLM GmbH – SAL 400 S při teplotě $35 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ s 100 % vlhkostí po dobu 100 hodin, v případě vzorků vyrobených v autoklávu 200 h, obrázek 4.23. Podmínky simulovaly výše popsané reálné zatížení. Vzorky byly poté vyjmuty a během několika hodin podrobeny zkouškám na tah a ohyb. Mezi výsledky měření patřily maximální hodnoty pevnosti, modulu a deformace. Aby se předešlo zvýšené nasákavosti na řezu vzorků – boční hrana, byly tyto zatřeny epoxidovou pryskyřicí, která vytvrzovala za pokojové teploty min 72 h před použitím vzorků.



Obr. 4.23 Umístění vzorků v komoře.

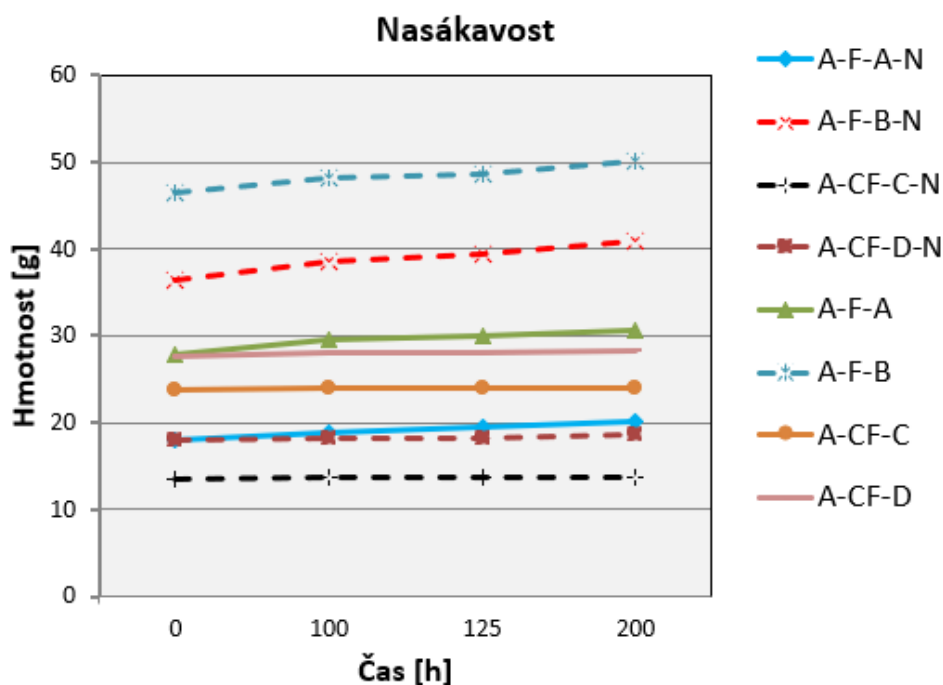
Podmíněné vzorky byly testovány pouze pro len UD, len dvouosý a hybridní materiály. Ostatní materiály – sklo a uhlík – jsou standardní a jejich hodnoty degradace v prostředí jsou známy [242] [243]. Při vlivu vlhkosti se tloušťka testovaných vzorků vyrobených infuzí zvýšila následovně: o 11,8 % pro lenný vzorek UD, o 13,9 % pro lenný vzorek dvouosý a o 2,34 % pro hybridní vzorek. Zřejmý rozdíl pozorovaný u hybridní vzorku lze připsat efektu epoxidové mezivrstvy umístěné mezi lenným jádrem a uhlíkovým krytem. Mezivrstva je poškozena, tj. mikro-delaminována, okolní vlhkostí a různou smáčivostí jednotlivých vrstev (také dokumentováno např. v [244] [239]). Navíc vlákna nasáklá vlhkostí stlačují okolní epoxidovou pryskyřici a přispívají k tvorbě mikrotrhlin.

Pro vzorky vyrobené v autoklávu tj. A, B, C a D byla kromě změny tloušťky měřen i váhový přírůstek v čase. Také na základě zkušeností s prvními vzorky vyrobenými infuzí, byla zvolena pro část vzorků dodatečná ochrana proti vlhkosti průmyslovou barvou. Pro účely zjištění účinku ochranného nátěru byly vytvořeny vzorky s nástřikem barvy Tech Aerosol – Akryl – univerzální. Tato barva je určena pro běžné ošetření materiálů a reprezentuje stav při běžném používání dílců v běžné průmyslové praxi. Barva byla aplikována ve třech vrstvách, celková tloušťka nanesené barvy byla $107,25 \pm 0,97 \text{ } \mu\text{m}$ na hladké straně vzorku, na straně vzorku, kde se nacházela strhávací tkanina je průměrná tloušťka $94,67 \pm 15,20 \text{ } \mu\text{m}$ je zde patrná velký rozptyl zapříčiněný nerovností povrchu, výsledný povrch je ale dobře kryt barvou a nerovnosti jsou vyplněny, obrázek 4.24.



Obr. 4.24 a) Vzorky opatřeny barvou před testem, b) výbrus vzorku s barvou – hybridní materiál uhlík – len.

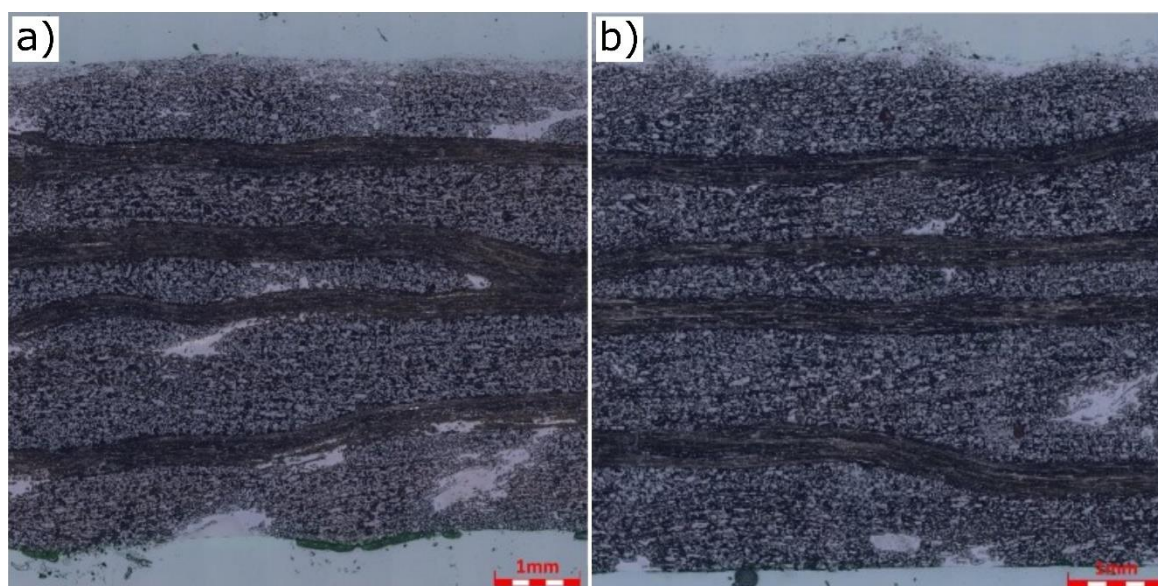
Graf váhového přírůstku je zobrazen na obr. 4.25, hodnoty v Tabulce 4.13. Je zde patrný mírný nárůst hmotnosti v čase, a to zejména pro lněné materiály. U čistě lněných materiálů s nástřikem barvou se projevuje nižší nasákavost, kromě vzorků A-F-B – 4 vrstvy lnu, tento vzorek oproti jiným měl po vytvoření větší podíl otřepů a bylo nutné zapracovávat více hranu vzorku s větší pravděpodobností defektů, což mohlo ovlivnit měření. Více se těmto defektům z obrábění věnují další kapitoly práce. Nejvyšší nasákavost, rozdíl hmotností, vykazují vzorky lnu se 4 vrstvami, poté s 8 vrstvami a nejmenších hodnot dosahují hybridní vzorky, kdy objem lnu zvyšuje nasákavost vzorku.



Obr. 4.25 Graf váhového přírůstku pro jednotlivé vzorky.

Tab. 4.13 Hodnoty nasákavosti použitých materiálů.

Vzorek	m_p [g]	m_k [g]	Δm_{200h} [g]	Δm_{200h} [%]
A-F-A-N	$17,95 \pm 1,34$	$20,14 \pm 0,11$	2,20	12,26
A-F-B-N	$36,47 \pm 1,75$	$40,90 \pm 0,07$	4,43	12,14
A-CF-C-N	$13,56 \pm 1,81$	$13,81 \pm 0,1$	0,24	1,81
A-CF-D-N	$17,98 \pm 0,19$	$18,57 \pm 0,05$	0,59	3,28
A-F-A	$27,79 \pm 0,70$	$30,65 \pm 1,34$	2,85	10,27
A-F-B	$46,42 \pm 1,77$	$50,03 \pm 1,75$	3,62	7,79
A-CF-C	$23,69 \pm 0,18$	$24,03 \pm 0,19$	0,33	1,41
A-CF-D	$27,63 \pm 0,55$	$28,29 \pm 0,70$	0,67	2,42



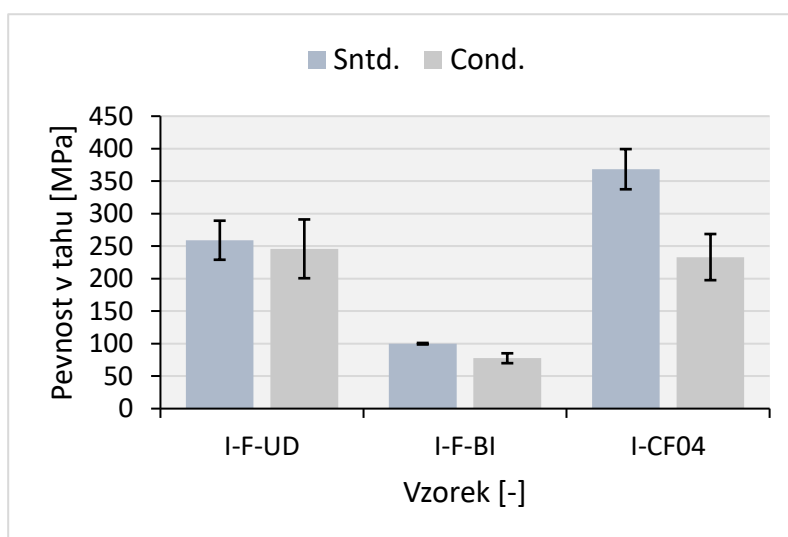
Obr. 4.26 a) Výbrus vzorkem po testu nasákavosti, b) výbrus suchým vzorkem.

Změny na mikrostruktuře jsou zobrazeny na obrázku 4.26, pro obě varianty suchou – b), i po testech nasákavosti s barvou je materiál a). Změny na výbrusu pomocí optické metody nejsou detekovatelné, tloušťka se u vzorku přesto zvýšila o 0,12 mm, což značí vliv nasákavosti a změnu velikosti laminátu po testu, tato změna je nevratná a kompozit se již po zpětném vysušení nemění.

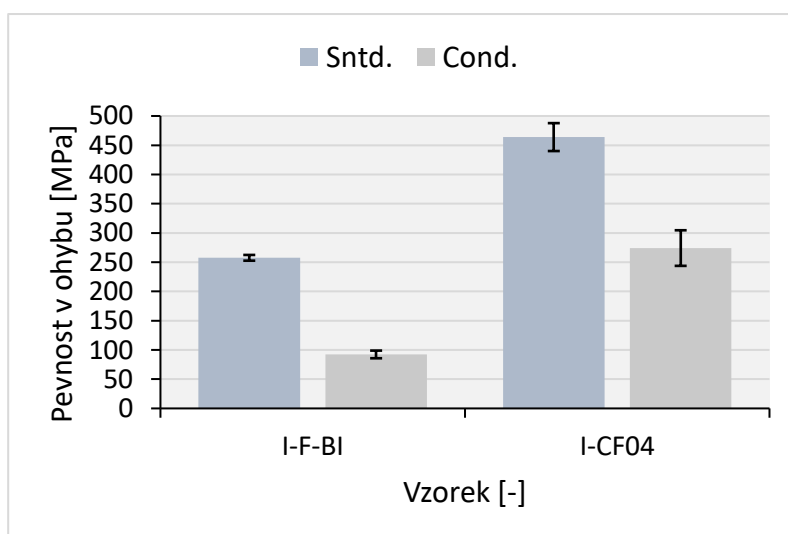
Z tahových testů, jejichž výsledky jsou shrnuty na obrázku 4.27, je zřejmé, že standardní odchylka se zvýšila u všech lenných vzorků. Kromě toho se změna tahových vlastností projevila minimálně, s výjimkou hybridních kompozitů, u kterých byly hodnoty o 28 % nižší (ve srovnání se standardními vzorky). To lze hlavně připsat vlivu vlhkosti na rozhraní materiálů, tj. místu,

kde byl zahájen zlom. Tyto závěry podporuje studie [245], která uvádí korelaci mezi nárůstem tloušťky materiálu, poklesem mechanických vlastností a výskytem zlomu.

Lněný materiál UD a hybridní tkanina byly testovány třibodovým ohybovým (obázek 4.28 pro výsledky ohybové pevnosti). Podobně jako výsledky tahových testů znázorněných na obr. 4.26 ukázaly výsledky ohybových testů, že vlhkost snižuje vlastnosti hybridního materiálu. Nicméně pokles hodnot dosažených pro vzorek Len UD byl ještě více patrný (více než 60 %). Srovnatelné výsledky získali César dos Santos a kol. [246], kteří dosáhli ohybové pevnosti $248,02 \pm 26,24$ MPa pro podélný vzorek a ohybové pevnosti $77,93 \pm 8,25$ MPa pro vzorek umístěný po dobu čtyř dnů v prostředí se 100% vlhkostí (což je v souladu s tímto experimentem). V prezentované studii stále vykazovala hybridní tkanina vyšší hodnoty dané uhlíkovou vrstvou. Jádru samo o sobě se chovalo jako sendvičová struktura primárně zatížená smykovým napětím. Proto pokles ohybových hodnot nebyl tak velký jako u vzorku Len UD [247].



Obr. 4.27 Pevnost v tahu vzorků po testech nasákavosti.

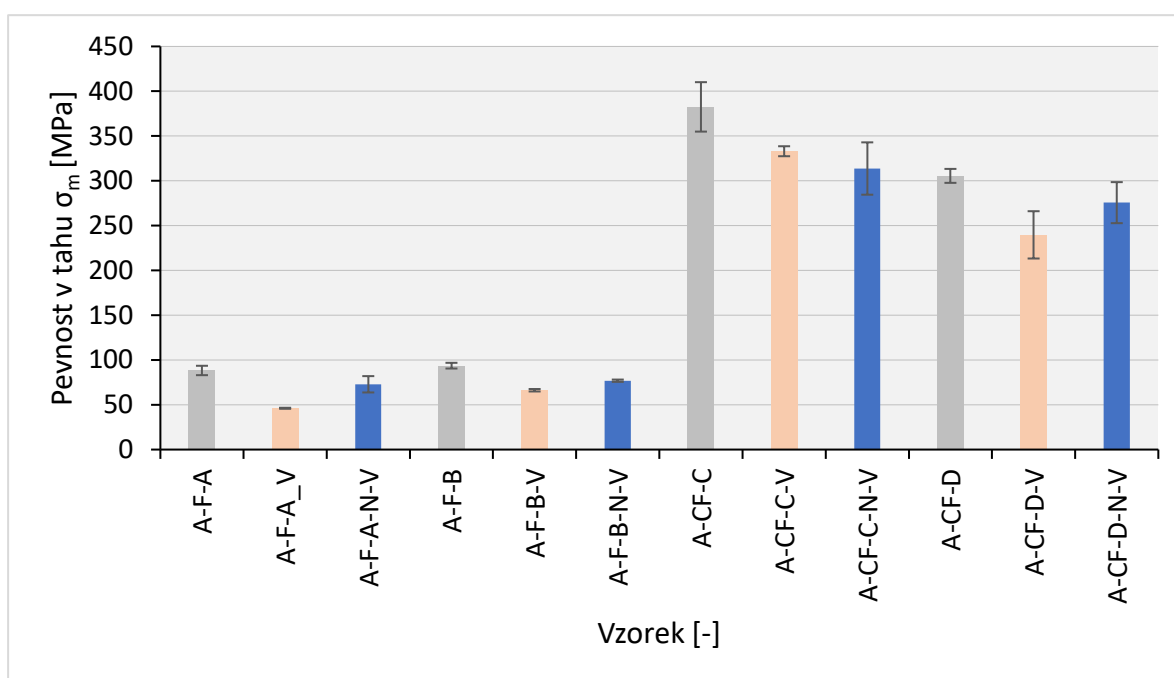


Obr. 4.28 Pevnost v ohybu vzorků po testech nasákavosti.

V případě porovnání vzorků vyrobených autoklávovou technologií jsou rozdíly patrné z obr. 4.29 kde jsou porovnány vzorky lněné (A-F-A; A-F-B), hybridní (A-CF-C, A-CF-D), po testu nasákavosti (A-XX-V) a po testu nasákavosti s barvou (A-XX-N-V), kde XX značí typ vzorku před nasákavostí. Z grafu jsou patrné nižší hodnoty mezi pevnosti, a to až o 47 % u 4 vrstvého lněného laminátu, 29 % u 8 vrstvého laminátu. V případě využití nátěru je snížení jen o cca 17 % u obou tloušťek laminátu. Změny těchto hodnot lze spojit s hodnotami nasákavosti, kdy jsou trendy shodné. Lamináty opatřeny nátěrem mají stejnou procentuální změnu váhy a dosahují i shodného procentního snížení meze pevnosti. U vzorků, které nebyly opatřeny nátěrem vyšší nasákavost značí i vyšší snížení meze pevnosti. Vzorky s nátěrem dosahují nejvyšší nasákavosti, ale v tomto případě není dán poměr mezi nasákavostí laminátu a nasákavostí barvy, která může ovlivnit hmotnostní přírůstek, ale samotná barva neovlivňuje pevnost v tahu, díky svým nízkým hodnotám meze pevnosti – jednotky MPa [248]. Rozptylu u všech vzorků se pohybují na relativně nízkých hodnotách do max. 10 MPa.

V případě hybridních laminátů je situace odlišná, díky vnější nosné vrstvě uhlíkových vláken, která také přichází jako první do styku s vlhkostí. U všech vzorků nastalo snížení vlhkosti, a to o 12 % u jedné vrstvy lnu a 21 % u dvou vrstev lnu v kompozitu, je tedy patrné, že s přibývajícím procentem lnu klesá pevnost u suchého laminátu a násobně více i pro vzorky po nasákavosti. U vzorků opatřených nátěrem se nepotvrdilo zlepšení pevnosti u jedné vrstvy, hodnoty ovšem mají značnou směrodatnou odchylku, kdy měření bylo ovlivněno selháním několika vzorků při nízkých hodnotách. Celkově pro hybridní materiály jsou rozptyly hodnota v rozmezí od 5 do 29 MPa což je násobně výše než u vzorků čistě lněných.

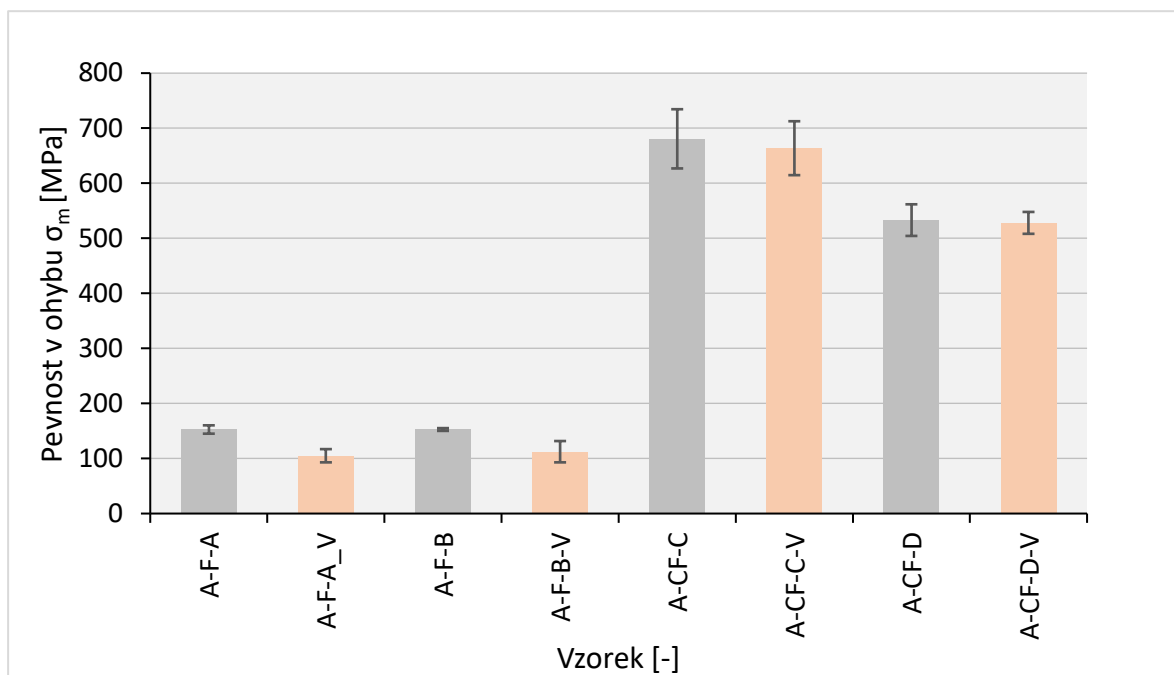
V případě porovnání vlivu technologie lze srovnat hybridní lamináty, kdy infuzní materiály dosahují změny pevnosti 28 % a při autoklávové technologii pouze 17 % resp. 9 %. Je zřejmé, že technologie výroby ovlivní nasákavost i změnu mechanických vlastností.



Obr. 4.29 Porovnání maximální pevnosti vzorků lněných a hybridních, po testu nasákavosti s a bez nátěrem.

Zkouška ohybem proběhla pro porovnání vzorků před a po zkoušce nasákavosti, nebyl proveden experiment s barvou. Výsledné hodnoty maximálního napětí v ohybu jsou zobrazeny na obr. 4.30. Pokles hodnot u lněných vzorků je o 31 % a 26 % u vzorku s vyšší tloušťkou. Tyto

hodnoty poklesu jsou nižší než u zkoušky tahem. Hybridní lamináty mají nižší pokles než u zkoušky tahem a to o 2,5 % a 0,9 %, u hybridních vzorků je opět vyšší rozptyl hodnot. Při porovnání s hodnotami pro vzorky infuzované je zřetelný rozdíl v chování při ohybu. Vzorky z autoklávy mají zanedbatelný pokles oproti vzorkům infuzovaným, kde byl pokles až o 30 %. Je zde patrná souvislost mezi pórovitostí vzorků pro dané technologie a velikostí nasákavosti. Jak již byl zmíněno výše, při ohybu se hybridní materiál chová obdobně jako sendvičový materiál, v případě zvýšení pórovitosti a dalším rozrušení laminátu vlivem vlhkosti je patrné značné snížení maximálního napětí v ohybu.



Obr. 4.30 Porovnání maximální pevnosti v ohybu pro vzorky lněné, hybridní v základním stavu a po testu nasákavosti.

Dílčí závěry

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.

4.2 Frekvenční charakteristika a útlum hluku KPV

Útlum zvuku a vibrací je důležitou vlastností KPV. Proto 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 a skládá se z přibližně 30 dílů, které jsou slepeny, nebo mechanicky spojeny. Požadavkem je snížit vibrace a hluk působící na jezdce a okolní prostředí při zachování mechanických vlastností a příznivé hmotnosti.





Dostupné studie se zaměřovaly především na vliv pohonného systému na vibrace [249] [250] [251]; nezabývaly se však mechanickým spojením s trupem vodního plavidla. Vzhledem k vnitřní konstrukci plováku, prostoru baterie a pohonného systému, v němž jsou umístěny, nelze použít sendvičové konstrukce. Ty by musely být velmi tenké, a tudíž náchylné k rychlému selhání v důsledku dynamického zatížení od pohybu jezdce a okolních vln. Proto je třeba použít tenkostěnné díly o tloušťce do 2 až 3 mm. V případě lněných materiálů a tkanin se většina dostupných studií zaměřila na materiály s podobnou tloušťkou, ale hodnotila pouze vybrané vlastnosti materiálu [252] [189] [123]. Například pouze několik autorů studovalo chování variabilních tkanin podobných kepru prostřednictvím mechanických vlastností a tlumících charakteristik [197] [253]. Pro komplexní charakterizaci vlastností by měly být z hlediska mechanických vlastností vyhodnoceny různé druhy tkanin (keprové, biaxové, UD atd.) od jednoho výrobce a následně testovány pro použití v hybridních tkaninách. Kromě toho by kompozitní tkanina měla být symetrická, protože se plánuje její výroba pomocí autoklávů - rovnoměrné složení je nezbytné pro eliminaci teplotního namáhání a následné deformace, tj. pružení, po vytvrzení [254]. Kromě toho by měl být testován vliv vlhkého prostředí [255]. Součástí vybranou pro zde prezentovanou studii byl kryt motorového prostoru elektromotoru.

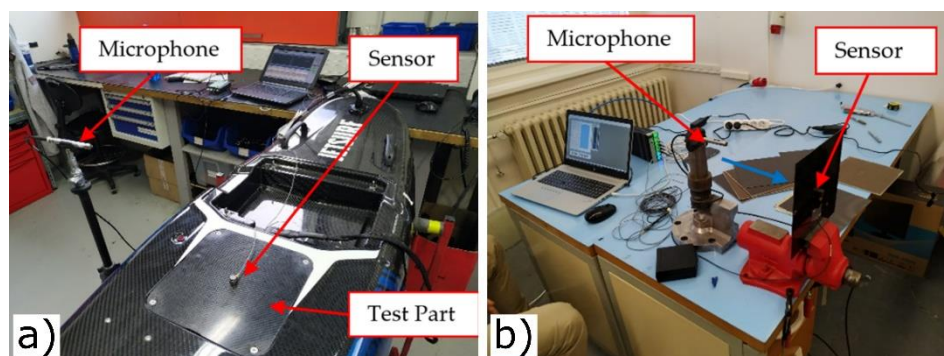
Test reálné součásti

Součást pro testování v reálném prostředí - kryt motoru - byla vyrobena pomocí technologie vakuové infuze a lze ji vidět na Obrázku 4.34a (kryt plovacího motorového prostoru je umístěn v oblasti senzoru). Složení dílu bylo určeno v souladu s testy vzorků; byly vyrobeny tři typy vzorků (D01-D03). Vzorek D01 byl vyroben ze čtyř vrstev tkaniny o gramáži 200 g/m² s vnitřním lnným vložením 2 × 200 g/m², končícím 20 mm od okraje, aby se zabránilo pronikání vlhkosti do lněné oblasti. Okraje byly doplněny uhlíkovou tkaninou pro udržení konstantní tloušťky, hmotnost byla 273 g. Vzorek D02 byl vyroben identicky jako vzorek D01, ale s kompletním lněnou mezivrstvou (sahajícím až k okrajům); hmotnost vzorku byla 223 g. Složení vzorku D03 se skládalo ze čtyř vrstev tkaniny GG600T (Deltapreg, Itálie) o gramáži 600 g/m²; hmotnost vzorku byla 265 g. Po výrobě byly vzorky řezány do požadovaných tvarů pomocí robota KUKA KR 60HA s obráběcím vřetenem a slinutým karbidovým nástrojem s diamantovým povlakem.

Měřeny byly hodnoty RMS (Root Mean Square) mechanických vibrací, hladiny hluku a dynamických vlastností. K hodnocení dynamických vlastností vzorků bylo vybráno měření FRF (frekvenční odezvy). K provedení experimentálních měření bylo použito zařízení Brüel & Kjaer Photon +, viz tab. 4.14. Měření FRF bylo prováděno v laboratorních podmínkách. Pro upnutí kompozitních vzorků byl použit svěrák (obrázek 4.34b). Při výměně vzorků byl kladen důraz na zachování stejných poloh vzorků ve svěráku, pozice akcelerometru a úderý modálním kladivem. Byl vybrán akcelerometr typu 4517, protože jeho nízká hmotnost neovlivňuje výsledky FRF a nízká citlivost brání přetížení senzoru. Každý vrchol FRF představoval frekvenci, na které systém nadměrně kmital. Tato funkce mohla být použita k výpočtu Youngova modulu, faktoru ztráty a tlumícího poměru při různých rezonančních frekvencích každého vzorku [256].

Tab. 4.14. Brüel & Kjaer měřicí vybavení.

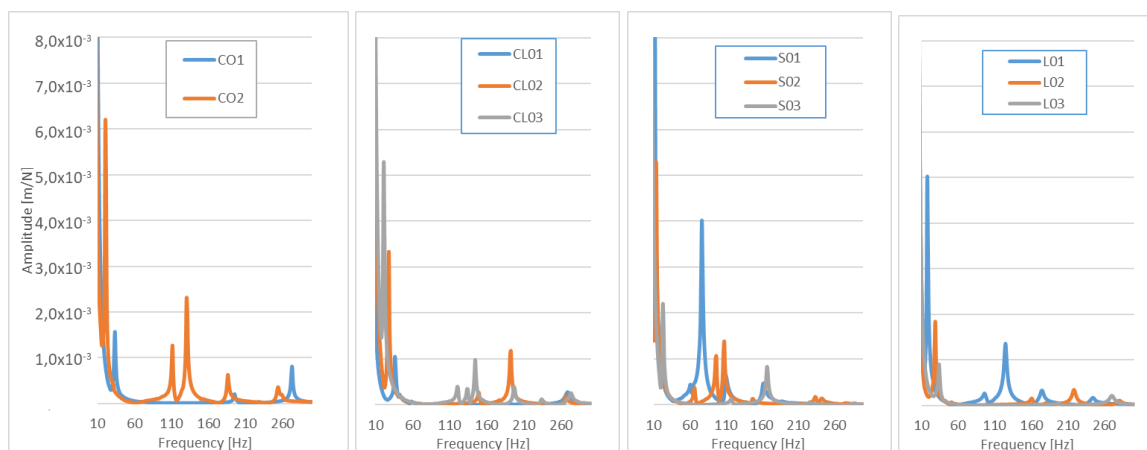
Analyzátor	Akcelerometr	Mikrofon	Modální kladívko
Photon+	4517 mini ACC	4189	8204
			
Analogové kanály: 4 vstupy/2 výstupy Rozsah frekvencí: 84 kHz Dynamic range: 115 dB	Citlivost: 1,02 mV/g Rozsah frekvencí: 20 kHz	Citlivost: 50 mV/Pa Rozsah frekvencí: 20 kHz	Citlivost: 22,7 mV/N Rozsah sil: 220 N



Obr. 4.34 a) Reálné měření hluku na motorovém plováku, b) laboratorní měření odezvy desek.

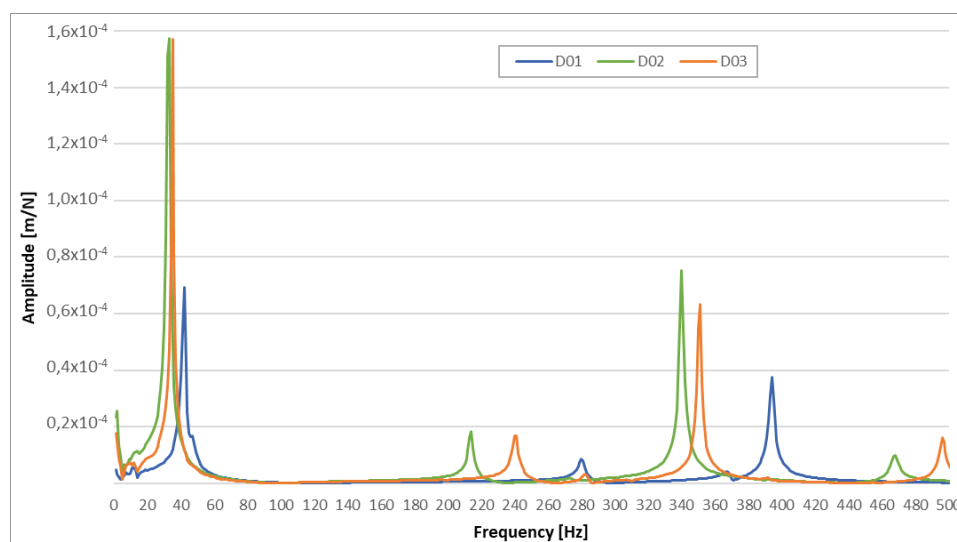
Svěrák není nejvhodnějším řešením pro upevnění vzorků, nicméně všechny vzorky byly testovány za identických podmínek. První měření FRF ukázalo, že vzorky z uhlíkových vláken vykazovaly nejvyšší amplitudy na vyšších frekvencích ve srovnání s ostatními testovanými materiály, které měly nižší amplitudy na nižších frekvencích (viz obr. 4.35). Tloušťka a hustota kompozitu jsou nejrelevantnější parametry které mají významný dopad na dynamické vlastnosti vzorku. Ve srovnání s uhlíkovými a skleněnými vzorky vykazovaly hybridní a lněné vzorky lepší útlumové hodnoty; lněný vzorek vykazoval nejvhodnější vlastnosti. Výsledky frekvenčních analýz byly v souladu s dříve publikovaným výzkumem Chinnasamyho [257] a [205] [206], který hodnotil sisalová a jutová vlákna pomocí funkce FRF. Hybridní kompozit len–uhlík byl testován Fairliem [256]. Potvrdil vztah mezi snížením tlumení a množstvím obsahu lnu v kompozitu. Nicméně použil odlišné měřicí metody a měřené vzorky. Výsledky pro různé kombinace uhlík–uhlík lze také nalézt v práci Assara et al. [197]; prováděli srovnání ohýbacího modulu a specifického tlumení pro materiál složený ze stejných komponent jako ty použité v prezentované práci.

Dynamické chování lze určit pomocí měření FRF nebo modální analýzy. Singh a spol. [253] použili měření FRF ke studiu vlivu obsahu epoxidové pryskyřice na frekvenční a tlumicí charakteristiky kompozitních vzorků. Hassani [258] se zaměřil na detekci strukturálních vad v kompozitních materiálech pomocí měření FRF. Přesto publikované studie se většinou zabývají teoretickými studiemi a soustředí se na vývoj matematických modelů pro předpovídání a charakterizaci dynamického chování různých kompozitních materiálů (např. [259] [260] [261]). Z tohoto důvodu nelze zde získané výsledky přímo srovnávat s výsledky jiných vědců, kteří se zabývají kompozitními materiály.



Obr. 4.35 Měření FRF kompozitních vzorků: CO - Uhlík, CL - hybrid uhlík-len, S - Sklo, L - Len.

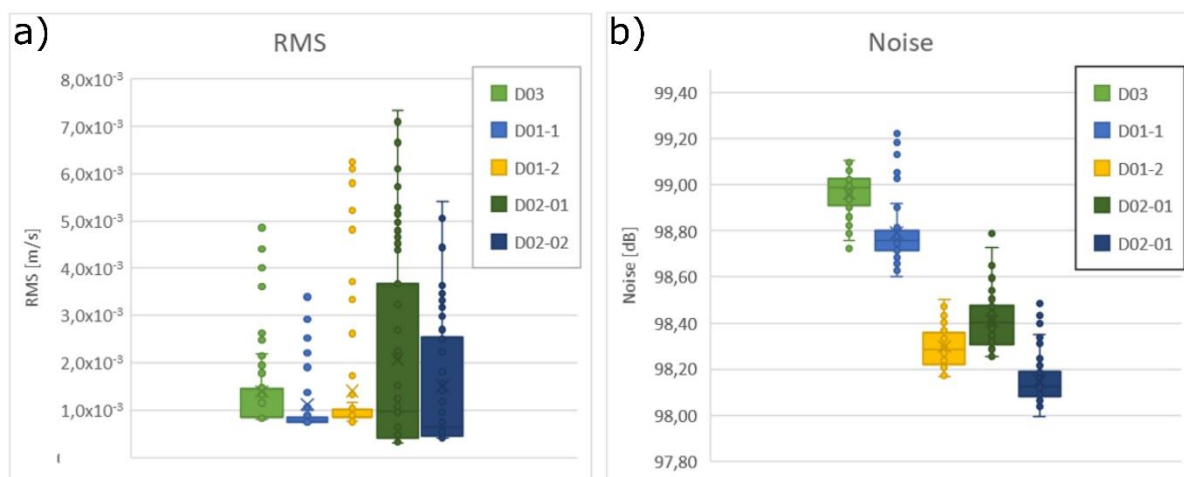
Na základě získaných výsledků bylo rozhodnuto sestavit finální část prototypu z lněného hybridního kompozitu. Finální prototyp vybrané části byl testován přímo namontovaný na elektrickém osobním plováku (viz Obrázek 4.34), stejně jako upnutý ve svěráku. RMS a hladiny hluku byly měřeny při montáži na vodním skútru a FRF byly měřeny při upnutí ve svěráku. Měření FRF ukázalo, že nejlepší výsledky byly získány pro vzorek D01; rozdíly mezi amplitudami a dominantními frekvencemi pro vzorky D02 a D03 byly zanedbatelné, viz obr. 4.36.



Obr. 4.36 Hodnoty FRF pro finální prototypy.

Finální testování prototypových dílů namontovaných na vodním skútru bylo provedeno při maximálních otáčkách motoru, tj. $7\,200\text{ min}^{-1}$. RMS a hladina hluku byly vypočítány pro

frekvenční rozsah 0–3,2 kHz. Akcelerometr byl upevněn speciálním voskem uprostřed testovaného vzorku, viz Obrázek 4.34a. Výsledky hladiny hluku nejsou zcela jednoznačné, protože prototypová část je jen malá podkomponenta, která neovlivnila výsledky ve větší míře. Problémy byly nestabilita kolísání rychlosti motoru a špatná opakovatelnost měření. Výsledky měření RMS jsou zobrazeny na obr. 4.37a a hladiny hluku na obr. 4.37b. Nejvýhodnější výsledky RMS byly získány pro vzorky D01-1 a D01-2. Tento fakt byl v souladu s výsledky měření FRF vzorků upnutých ve svěráku. Hodnocení hladiny hluku je typicky prováděno za odlišných podmínek během provozu na vodě (zejména u dieselových motorů) [262]. Zde získaná hladina hluku byla vyšší než doporučená [263], což lze připsat skutečnosti, že měření bylo prováděno při vysokých otáčkách (více než 80% maxima) v uzavřeném prostoru. Vzdálenost mikrofону a zaznamenané frekvence mohly také ovlivnit výsledek.



Obr. 4.37 Výsledky měření RMS (a); výsledky měření hladiny hluku (b).

Dílčí závěry

Měření provedená na reálné součásti byly realizovány 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 dílům uhlíkovým monolitním nižší přenosové funkce a vibrace dosahují menších amplitud při mírném přeladění frekvencí. Útlum hluku je také znatelný při využití lněných materiálů. Funkce tlumící je pro dané materiály a jejich hybridní formy aplikačně využitelný.

4.3 Obrábění kompozitu se lněnými vlákny

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.

4.3.1 Stanovení cílových parametrů měření a cílů experimentu

Hlavním cílem experimentu je výzkum řezivosti nástrojů pro kompozitní materiál se 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 a jejich vliv na výsledný produkt/proces, zdůvodnění výběru:

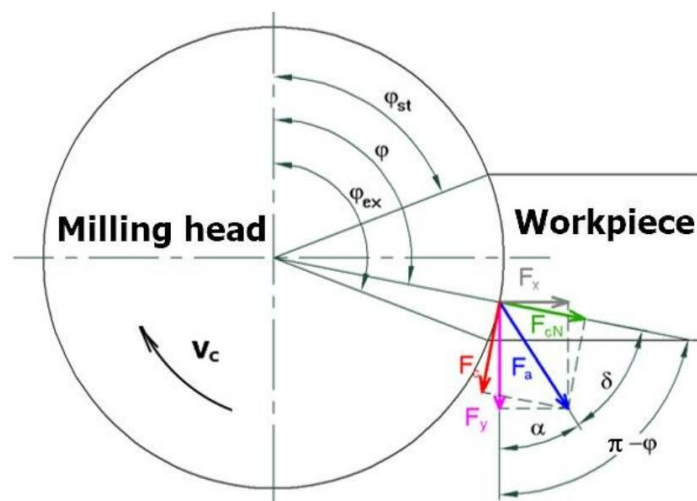
- Řezné síly – jejich vyhodnocením jsou získány informace o náročnosti obrábění. Přepočtem je získán měrný řezný odpor, který definuje odpor materiálu vůči řezání. Řezné síly ovlivňují zejména energetickou náročnost a způsobují další negativní jevy, jako jsou zvýšené vibrace, opotřebení nástroje a další. Vektory a jednotlivé síly jsou zobrazeny na obrázku 4.38.
- Vibrace – mohou být volné, samobuzené nebo vynucené. Ovlivňují, jak řezný proces, tak upnutí součásti a také zvukovou emisi při obrábění. Z praktického pohledu obrábění kompozitů obecných tvarů jsou vibrace jedním z hlavních faktorů ovlivňující maximální možný úběr při obrábění a zvýšené požadavky na upnutí obrobku z pohledu tuhosti. V případě kompozitů jde velmi často o tenkostěnné součásti. Vibrace nejsou generovány jen procesem obrábění, ale také samotným strojem, respektive jeho jednotlivými rotačními součástmi, jako jsou převodovka, ložiska, elektromotor, čerpadlo, atd. Zásadní z pohledu stabilního obrábění jsou ovšem dynamické vlastnosti stroje, které jsou dány konstrukcí. Tyto vlastnosti je možné změřit a použít pro sestavení diagramů stability pro danou soustavu SNOP, které umožní určit optimální řezné podmínky zaručující stabilní obrábění.
- Drsnost povrchu – jedno z hlavních kritérií pro finální vzhled a požadavek na výrobek. V případě kompozitů je cílová plocha ořezávaná hrana. Hodnoceny jsou dva parametry R_a a R_z , další možné jsou definovány normou ČSN EN ISO 21920-1:2023.
- Poškození materiálu – jde zejména o dva faktory obrábění typické pro kompozity a to o delaminaci a tvorbu otřepů po obrábění. Delaminace se vyskytuje zejména pro operace vrtání a soustružení, ale lze se s ní setkat i pro operace frézování křehkých materiálů, jako jsou uhlíková vlákna. V případě otřepů se setkáváme s jejich výskytem u houževnatějších materiálů, jako jsou aramidy a přírodní vlákna.

4.3.2 Přípravy měření

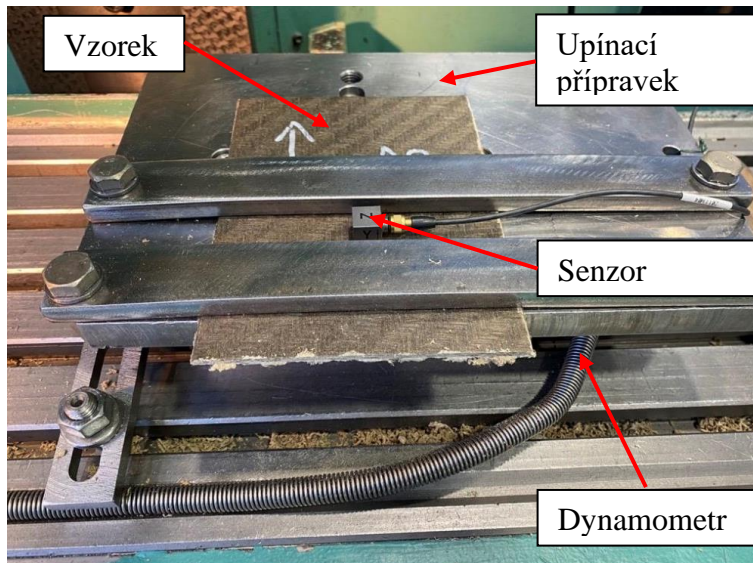
Vzorek měření - Testy obrábění probíhaly na vzorku vyrobeném v autoklávu A-F-D, postup a popis výše. Přehled použitých strojů a měřicích přístrojů:

- Stroj – frézka FV 25 CNC A, použita zrychlovací hlava ZP-10/X od společnosti NAREX PRAHA a.s. v kombinaci lze dosáhnout až $9\,000\text{ min}^{-1}$.
- Měřicí aparatura řezných sil – piezoelektrický dynamometr Kistler 9257B – tři komponentní měření – síly v osách X, Y, Z. Sestava se dále skládá z A/D převodníku a zesilovače Kistler. K vyhodnocení byl využit sw Dynoware. Dynamometr upnut ke stolu frézky upínkami. Použita snímkovací frekvence $4\,800\text{ Hz}$.
- Měření drsnosti povrchu – Surtronic S 128 s diamantovým snímacím hrotem.
- Měření geometrie nástrojů – Alicona Infinite Focus G5 – skenování 3D geometrie nástrojů, vyhodnocení v software GOM Inspect.
- Vibrace zaznamenány aparaturou Brüel & Kjær – analyzátozem Photon+ s připojeným 3-osým akcelerometrem. Aparatura je popsána v kap. 4.2. Akcelerometr byl umístěn vždy ve stejném bodě na obrobku tak, aby byla zaručena opakovatelnost měření a nedošlo k poškození snímače.
- Upnutí dílce pomocí přípravku přímo desku dynamometru, pro omezení snížení tuhosti a dalších vlivů.

Sestava s upnutým vzorkem je zobrazena na obrázku 4.39. Vzorek byl po dílčím řezu posouván o 10 mm a tím byl vždy vytvořen pásek o této tloušťce. Šířka vzorku byla stanovena na 125 mm . Řez probíhal do plného materiálu, tzn., že nástroj byl vždy plně opásán a byly získány maximální možné řezné síly pro daný nástroj. Souřadný systém dynamometrů byl ustaven pomocí setinových kalibrů ve směru os stroje, je tedy možné sesouhlasit i výpočtově osy $F_f = F_x$. Při případném přepočtu na sílu řeznou F_c je pak třeba složky dopočítat z aktuálního natočení nástroje nebo provést vektorový součin složek.

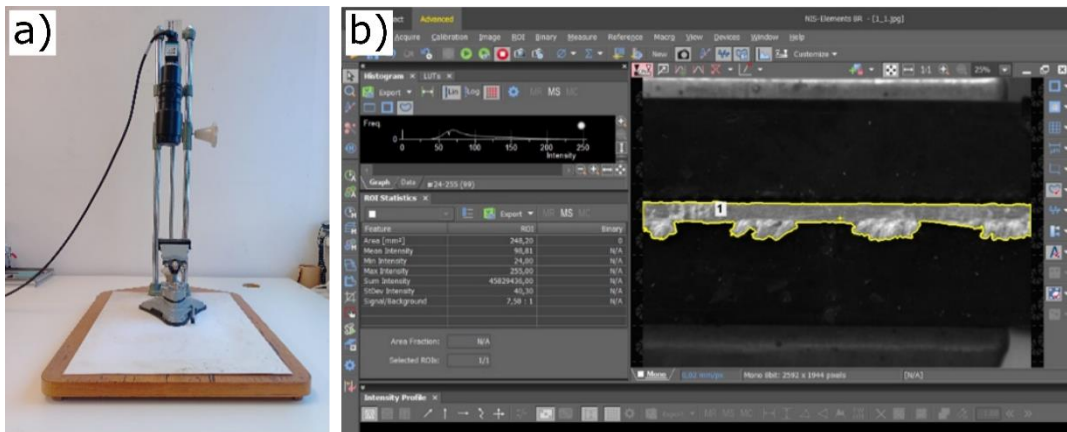


Obr. 4.38 Rozložení sil při frézování [264].



Obr. 4.39 Sestava měřící aparatury umístěná na stroji - dynamometr, senzor vibrací.

Analýza otřepů po obrábění byla realizována pomocí optické soustavy a stativu s monochromatickou kamerou a software NIS Element. Sestava je uvedena na obrázku 4.40a; náhled sw je na obrázku 4.40b. 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 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. Delaminace má význam hodnotit u vzorků bez výrazných otřepů.



Obr. 4.40 Měření velikosti otřepů.

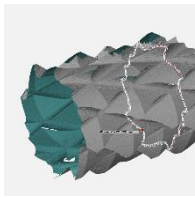
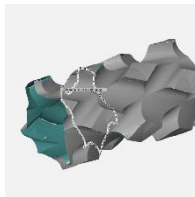
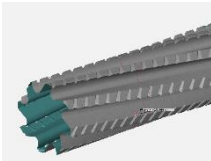




4.3.3 Plánování experimentu – DOE

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 – v_f – posuvová rychlost.

Nástroje – vzhledem ke specifčnosti obrábění kompozitních materiálů byly vybrány čtyři druhy nástrojů pro obrábění, jeden s klasickou šroubovicí se čtyřmi břity a 3 určené pro kompozitní materiály. Nástroje jsou uvedeny v tabulce 4.15. Nástroj 3 a 4 mají dvojitou opačnou šroubovicí 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. Vzhledem k tomu, že výrobci neuvádí základní informace o geometrii nástroje, byly nástroje č. 2–4 skenovány pomocí Alicona Infinit Focus G5 a úhly odvozeny v sw GOM Inspect.

Tab. 4.15 Použité nástroje a jejich geometrické parametry.

Nástroj	1	2	3	4
Výrobce	Pramet	Ceratizit	Ceratizit	Ceratizit
Označení	S7166.0	W.GFC-M.OST.KF.6,0.HA.K50	FRP-CR.G.ST.KF.6,0.HA.L	FRP.ST.KF.6,0.7°.Z8.R/R.HA.L
Počet zubů - z	4	(4)	(8)	8
Úhel čela - γ_0	10°	10°	9°	17°
Úhel hřbetu - α_0		28,5°	8,5°	18°
Úhel šroubovice	40°	20°	30°	7°
3D sken				
Obrázek				

Otáčky – otáčky byly voleny vzhledem k možnostem stroje a rezných materiálů v rámci jejich doporučených hodnot. Zvoleny byly tři úrovně otáček 4 200, 6 000 a 8 000 min^{-1} odpovídající rezným rychlostem 79; 113 a 151 m/min .

Rychlost posuvu – byla zvolena z hlediska rozdílného počtu zubů a jejich provedení na nástrojích. Hodnota parametrů vycházela z doporučených hodnot výrobců a vlastnostmi stroje a rovnala se přibližně posuvům na otáčku 0,2; 0,4; 0,6 mm .

Výsledné faktory a jejich úrovně jsou uvedeny v tabulce 4.16.

Tab. 4.16 Faktory a úrovně experimentu obrábění.

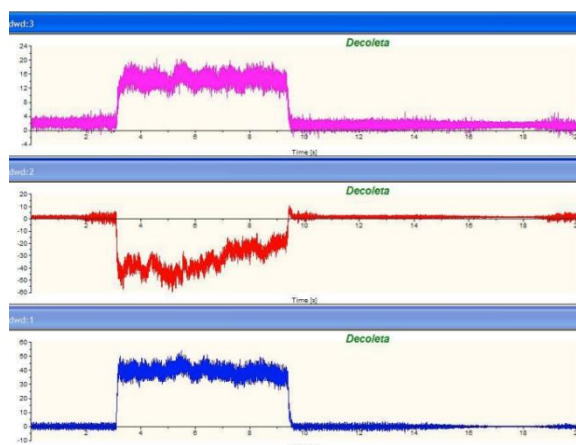
Faktor	Nástroj	Otáčky - n [min ⁻¹]	Posuv na otáčku [mm]
Úroveň 1	1	4 200	0,2
Úroveň 2	2	6 000	0,4
Úroveň 3	3	8 000	0,6
Úroveň 4	4	-	-

V rámci plánovaného experimentu byl vytvořen faktoriální 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.

Vyhodnocované odezvy, které se budou sledovat:

- F_a – aktivní síla,
- F_z – pasivní síla (F_p),
- R_z – střední hloubka drsnosti.

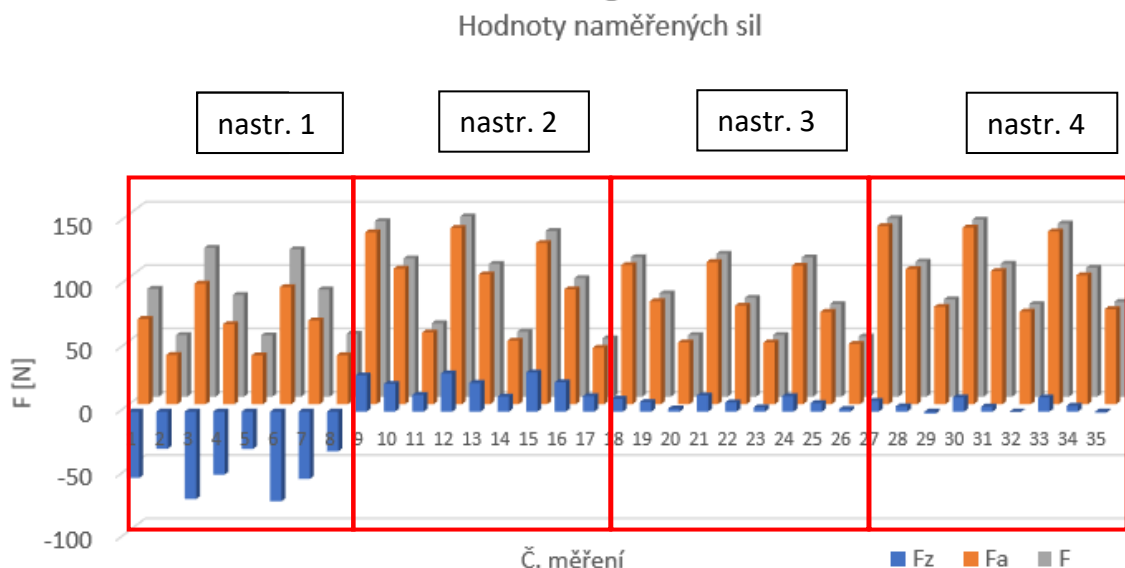
Zpracování řezných sil, z pohledu F_a a F_p (popis sil a jejich vztahů je uveden na obrázku 4.38) je provedeno z hlediska jejich vztahu k vibracím, které způsobují při obrábění kompozitů. Dominantní vliv v tomto ohledu má síla F_z (F_p), která primárně vyvolává vibrace a působí ohybem na nepodepřený materiál kompozitu. Síla F_a působí v ploše obrábění, působí na nástroj ve směru jeho ohybu a vibrací, reakčně poté působí i na obrobek. V rámci vyhodnocení jsou naměřené síly v časovém záznamu zpracovány pouze oříznutím oblasti náběhu a výběhu nástroje, viz obrázek 4.41. Síla je pro dané měření vypočtena jako aritmetický průměr bez filtrace dat. Drsnost R_z je vybrána z důvodů lepší statistické odchylky tvaru reálného povrchu oproti R_a a bude stanovena pro sousledné obrábění vzorků.



Obr. 4.41 Ukázka naměřených dat v sw DynoWare.

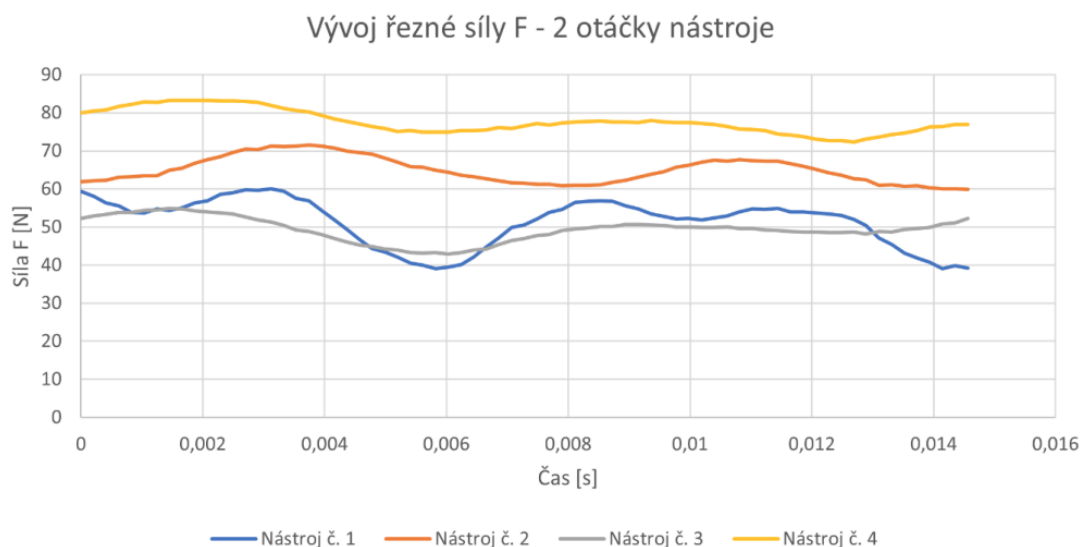
Naměřené hodnoty sil jsou zobrazeny na obrázku 4.42, jsou zde zvýrazněny oblasti pro daný nástroj. V případě nástroje č.1 nebylo možné dokončit první měření z hlediska zalepování nástroje a nepoužitelnosti dat. Pro tento nástroj je také patrné, že hodnoty řezných sil jsou záporné a výrazně vyšší oproti dalším nástrojům. Je to dáno šroubovicí, jejím úhlem a nepřerušeným ostřím, kdy jsou vlákna táhnuta po ostří v případě, že nedošlo k jejich přerušnutí

již při kontaktu v ortogonální rovině. Nástroj č. 1 také dosahuje nejnižších aktivních sil. Nízkých sil také dosahuje nástroj č. 3. Tento nástroj je stejně jako nástroj č. 1 čtyř-břity, ovšem s druhou obrácenou šroubovicí, které se velmi významně podílí na snížení pasivních sil na obrábění. Nástroje č. 2 a 4 dosahují obdobných hodnot pro aktivní sílu. Nástroj č.4 dosahuje nejlepších hodnot z hlediska působící pasivní síly – má také nejmenší úhel stoupání šroubovice ze všech nástrojů. Zvýšené hodnoty sil u nástrojů č.2 a 4 lze připsat zvýšenému počtu břitů s menším prostorem v oblasti čela, kde při vyšších rychlostech nemají kam odcházet třísky a nastává tzv. zalepování nástroje, kdy jsou třísky přechovány.



Obr. 4.42 Naměřené hodnoty sil – aritmetické průměr za průjezd, graf dělen dle nástrojů.

V případě analýzy dat v průběhu dvou otáček je celková řezná síla zobrazena na obrázku 4.43.

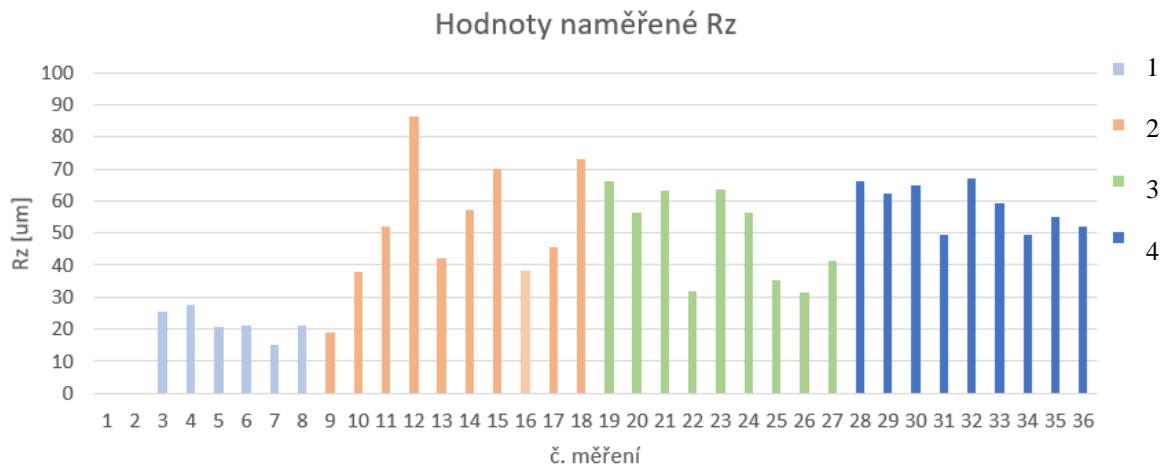


Obr. 4.43 Silové působení na nástroje během jedné otáčky.

Z obrázku 4.43 je patrné že nástroj č. 1 a 3 dosahují nejnižších hodnot a nástroj č. 1 nejvyššího kolísání během jedné otáčky. V rámci plného záběru je patrný harmonický charakter zatížení,

který je dán zubovou frekvencí. U nástroje č. 1, kde je jako u jediného nástroje nepřerušované ostří, je nejvyšší periodická změna sil při jedné otáčce, lze tedy předpokládat, že nástroj bude generovat vyšší hodnoty vynucených vibrací v porovnání s ostatními nástroji.

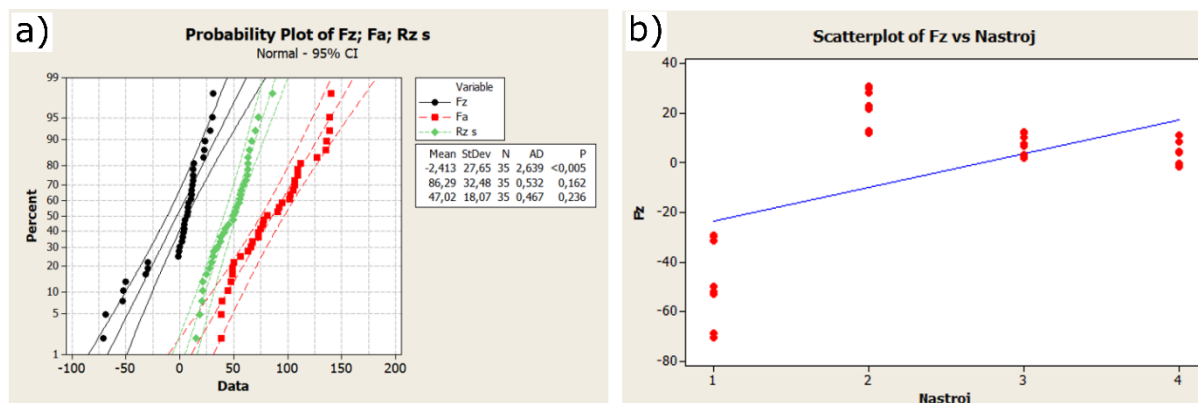
Hodnoty střední hloubky drsnosti Rz jsou uvedeny na obr. 4.44. Pro nástroj č. 1 jsou hodnoty nejmenší a naopak nejvyšší pro nástroj č. 2.



Obr. 4.44 Hodnoty naměřené Rz, barevně rozděleno pro jednotlivé nástroje.

4.3.4 Statistické vyhodnocení DOE

Z pohledu statistického vyhodnocení se nejdříve provedla kontrola nenáhodných a náhodných vlivů v měření. Zde můžeme použít testy normálního rozdělení. Protože chceme výsledky hodnotit se spolehlivostí 95% a tomu odpovídá hodnota $P = 0,05$, tak v případě, že P hodnota je vyšší než 0,05, tak nezamítáme hypotézu o normálním rozdělení. Rozložení dat je na obr. 4.45. 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 4.45b společně s regresní křivkou. V případě proměnných F_a a R_z lze hypotézu normálního rozdělení považovat za potvrzenou.



Obr. 4.45 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 otáčku, druhý nejvýznamnější faktor je tvar nástroje a jako poslední jsou otáčky, viz

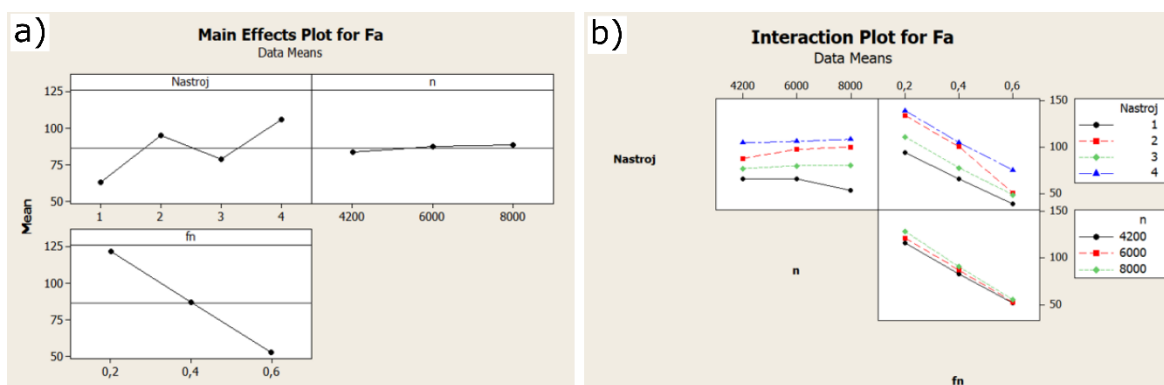
obrázek 4.46. Z hlediska interakcí není žádná významnější. Je to také patrné z obrázku 4.47a, kde jsou efekty faktorů vizualizovány. Z grafu na obrázku 4.47b je patrné chování nástroje č. 2, kdy při zvýšení posuvu na 0,6 nastává skokové zvětšení řezné síly, to může být dáno již ztrátou odvodu třísek z místa řezu.

Factor	Type	Levels	Values
Nastroj	fixed	4	1; 2; 3; 4
n	fixed	3	4200; 6000; 8000
fn	fixed	3	0,2; 0,4; 0,6

Analysis of Variance for Fa, using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Nastroj	3	9234,0	7500,0	2500,0	869,44	0,000
n	2	78,3	139,8	69,9	24,32	0,000
fn	2	25586,5	23389,0	11694,5	4067,04	0,000
Nastroj*n	6	119,2	134,0	22,3	7,77	0,002
Nastroj*fn	6	765,3	784,0	130,7	45,44	0,000
n*fn	4	46,0	46,0	11,5	4,00	0,031
Error	11	31,6	31,6	2,9		
Total	34	35860,9				

S = 1,69571 R-Sq = 99,91% R-Sq(adj) = 99,73%

Obr. 4.46 Analýza variance F_a .



Obr. 4.47 Graf hlavních efektů při obrábění na sílu F_a [N].

V případě hodnocení F_z je situace zcela odlišná, hlavní efekt ovlivňující velikost síly je nástroj vliv je velmi výrazný F-hodnota 21 460, jako další výrazný faktor se teprve projevuje interakce nástroje spolu s posuvem na otáčku, samotné otáčky mají zanedbatelný vliv z hlediska vyhodnocení síly F_z , obrázek 4.48.

General Linear Model: Fz versus Nastroj; n; fn			
Factor	Type	Levels	Values
Nastroj	fixed	4	1; 2; 3; 4
n	fixed	3	4200; 6000; 8000
fn	fixed	3	0,2; 0,4; 0,6

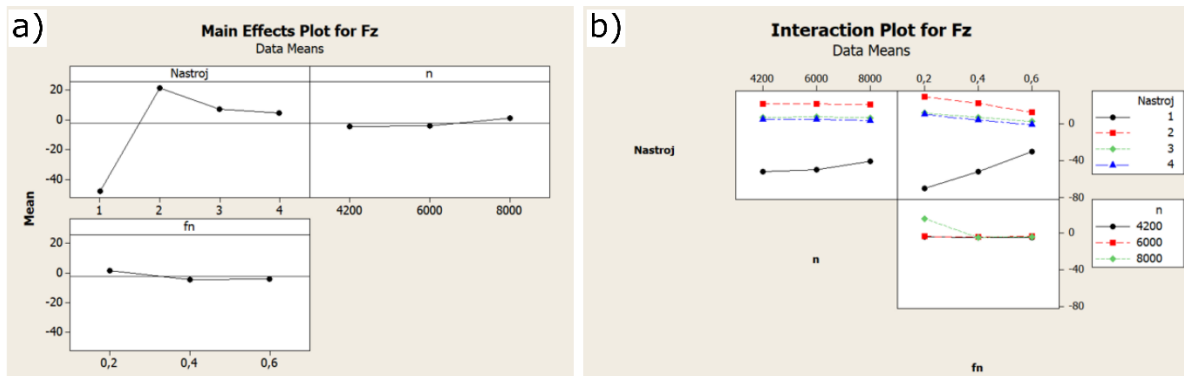
Analysis of Variance for Fz, using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Nastroj	3	23225,2	22242,0	7414,0	21460,76	0,000
n	2	14,7	6,7	3,4	9,76	0,004
fn	2	23,1	2,7	1,4	3,95	0,051
Nastroj*n	6	160,5	7,1	1,2	3,42	0,037
Nastroj*fn	6	2551,6	2476,0	412,7	1194,51	0,000
n*fn	4	7,2	7,2	1,8	5,21	0,013
Error	11	3,8	3,8	0,3		
Total	34	25986,1				

S = 0,587765 R-Sq = 99,99% R-Sq(adj) = 99,95%

Obr. 4.48 Analýza variance F_z

Z grafů na obr. 4.49 a je patrný významný vliv nástroje č. 1 na síly F_z . Další parametry jako otáčky a posuv takový vliv nemají. Obrázek 4.49b prezentuje interakce pro jednotlivé faktory

mezi sebou a interakce faktorů. Je zde dobře patrný vliv parametrů na nástroj č. 1, který má opačné tendence v případě zvyšujícího se posuvu a otáček než ostatní nástroje.



Obr. 4.49 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 obrázek 4.50 a 4.51. 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.

General Linear Model: Rz s versus Nastroj; n; fn

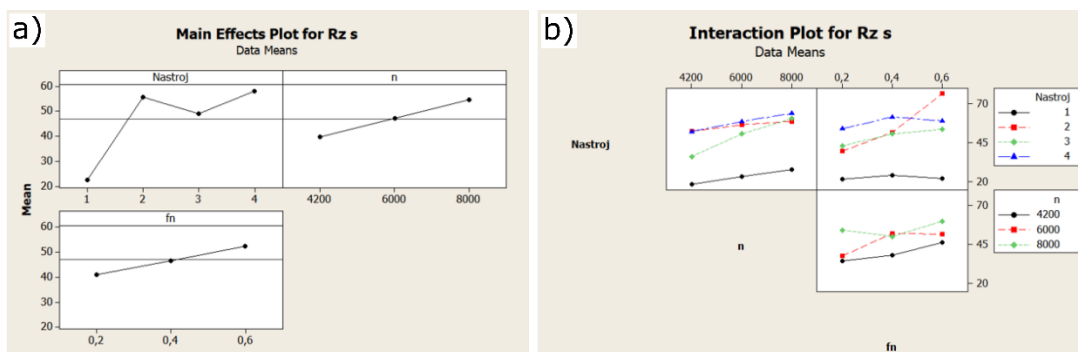
Factor	Type	Levels	Values
Nastroj	fixed	4	1; 2; 3; 4
n	fixed	3	4200; 6000; 8000
fn	fixed	3	0,2; 0,4; 0,6

Analysis of Variance for Rz s, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Nastroj	3	6661,05	5465,49	1821,83	36,04	0,000
n	2	983,81	972,45	486,23	9,62	0,004
fn	2	1002,58	798,97	399,49	7,90	0,007
Nastroj*n	6	325,28	273,03	45,51	0,90	0,528
Nastroj*fn	6	1364,82	1396,79	232,80	4,61	0,014
n*fn	4	206,54	206,54	51,63	1,02	0,438
Error	11	556,00	556,00	50,55		
Total	34	11100,08				

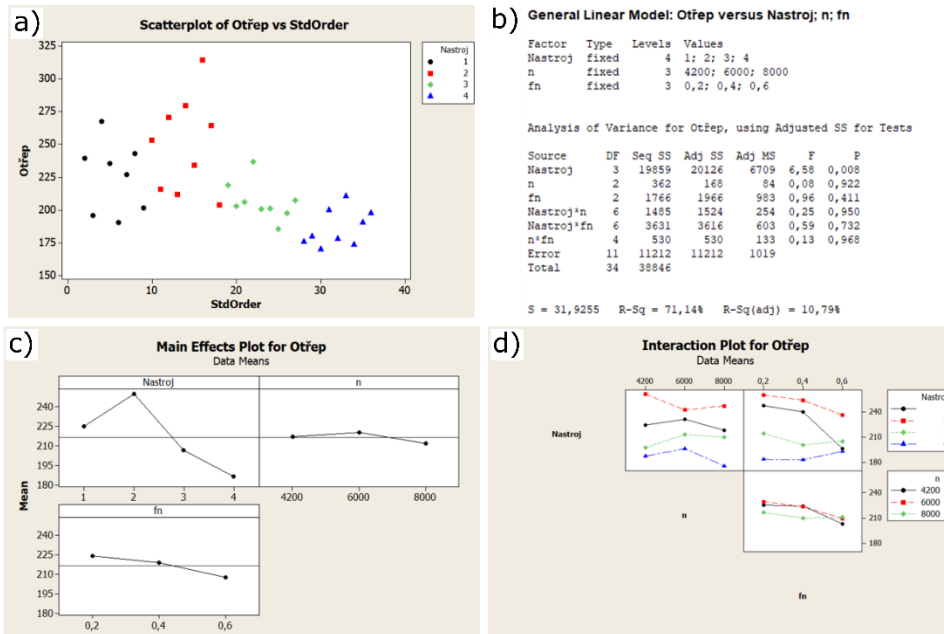
S = 7,10951 R-Sq = 94,99% R-Sq(adj) = 84,52%

Obr. 4.50 Analýza variance R_z .



Obr. 4.51 Graf hlavních efektů při obrábění na drsnost povrchu R_z [μm].

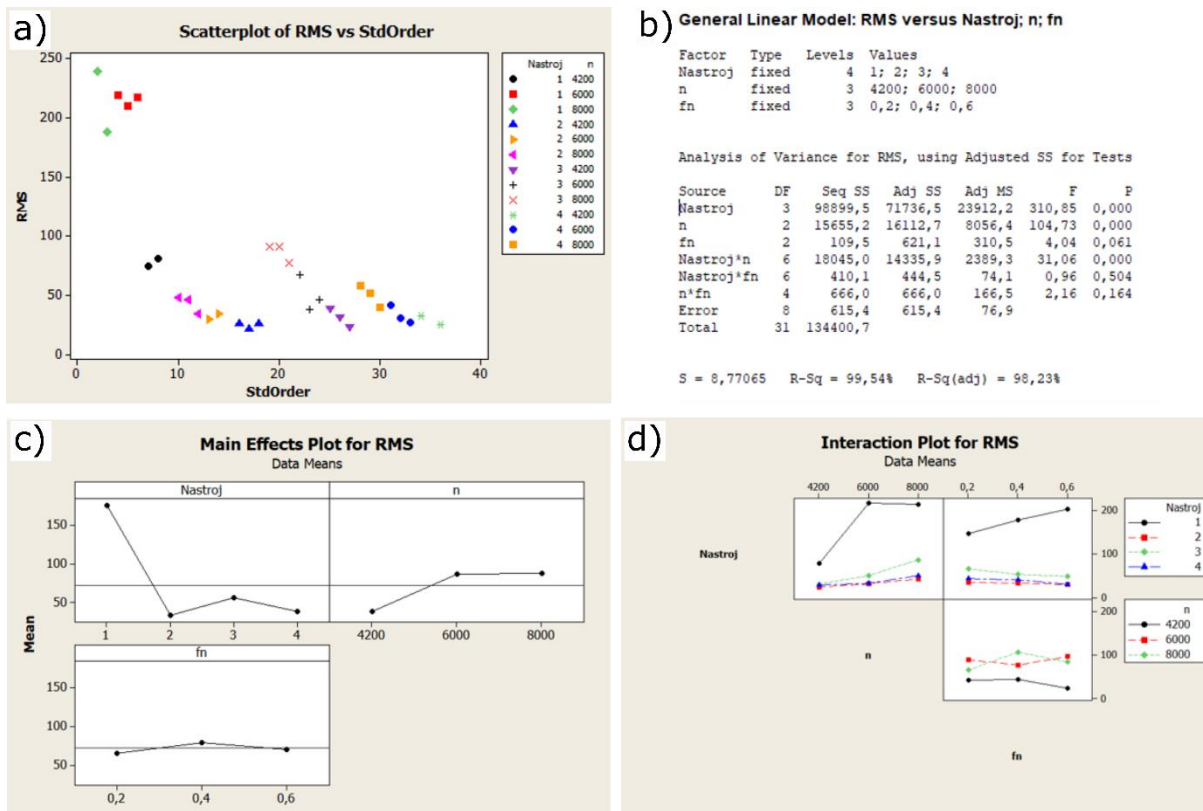
Analýza faktorů na otřepy je viditelná na obrázku 4.52a–d. Nejvyšším vlivem je opět nástroj, který zásadně ovlivňuje jejich velikost, což je dobře patrné z obrázku 4.52a. Nástroj č. 4 dosahuje pro všechny kombinace posuvů a otáček nejnižších otřepů. Je to dáno, jak počtem břitů, kdy při daném posuvu 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. 4.52 Analýza vlivu faktorů na otřepy - A₀.

V případě porovnání řezných podmínek a jejich vlivu je patrné, že pro nástroj č. 1 se zvyšujícími se podmínkami obrábění velikost otřepu klesá, podobně se v menší míře chovají i nástroje č. 2 a 3. Nástroj č. 4 dosahuje mírně zvýšených hodnot pro vyšší posuvy, vliv otáček je pro nízký počet vzorků nekonzistentní. Nejvyšších rozptýlů hodnot vzhledem k parametrům dosahuje nástroj č. 1 a 2, při jejich použití budou řezné podmínky klíčovým faktorem k dosažení minimálních otřepů.

Analýza vibrací byla provedena z hlediska jejich celkových úhrnů pomocí RMS (Root mean Square) - střední kvadratická hodnota, ta již byla pro hodnocení vibrací využita v kap. 4.2. RMS je statistická metoda používaná pro kvantifikaci velikosti nebo síly průběhu signálu, v tomto případě vibrací, v čase. Zjednodušeně je RMS hodnota používána pro charakterizaci průměrné intenzity vibrací přes časový interval. Umožňuje efektivní porovnání vibrací různých systémů nebo podmínek provozu. RMS hodnota je důležitá, protože poskytuje smysluplný způsob, jak kvantifikovat energii signálu vibrací. Statistické vyhodnocení je zobrazeno na obrázku 4.53a–d. Obrázek 4.53b 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 4.53a, kde jsou zobrazeny, jak nástroje, tak jednotlivé otáčky. Je patrné, že nejvyšších hodnot dosahuje nástroj č. 1 pro otáčky 6000 a 8000. Další nástroje již mají podobný průběh, kdy pro vzrůstající otáčky vzrůstají i vibrace. Vliv posuvu je na vibrace velmi malý.



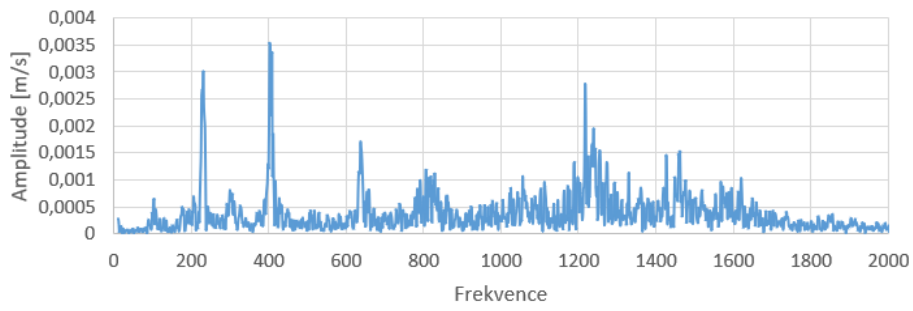
Obr. 4.53 Analýza vlivu na RMS.

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. FFT analýza byla provedena pro všechny nástroje a pro shodné podmínky obrábění je zobrazena na obrázku 4.54. Jednalo se o podmínky 6000 min^{-1} otáček, což odpovídá frekvenci 100 Hz a posuv na otáčku 0,2 mm.

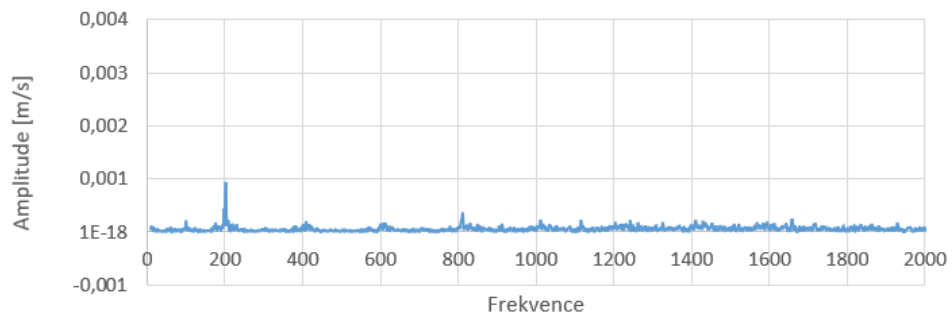
Z jednotlivých průběhů, viz obr. 4.54, je patrné, že u všech nástrojů je výrazná jak otáčková frekvence – dominantní pro nástroj č. 3, tak její harmonické násobky, které jsou ovlivněny zejména počtem zubů. Nástroj č. 1 má dominantní frekvence 200, 400, a 1200 Hz – což jsou násobky zubové frekvence pro 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 1200 Hz, které přesně odpovídají čtyřem zubům v záběru pro osmi břitý 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.

Vztah mezi jednotlivými výsledky pro hodnocení F_a , F_z , R_z , a otřepy byly hodnoceny pomocí analýzy korelace, kde je hodnocen Pearsonův korelační koeficient, který dosahuje hodnot od -1 a 1 a hodnotí míru vztahu jednotlivých odezev v závislosti na sobě, 1 znamená perfektní pozitivní lineární vztah, -1 znamená perfektní negativní lineární vztah, 0 naznačuje žádný lineární vztah. Dále je vypočítána hodnota P, která nám říká statistickou významnost obou hodnot, čím je hodnota menší až jdoucí k nule, tím je vztah mezi hodnotami významnější, viz obrázek 4.55.

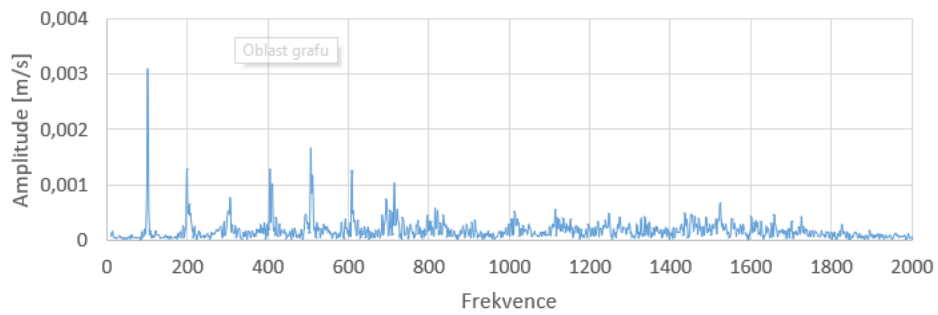
1



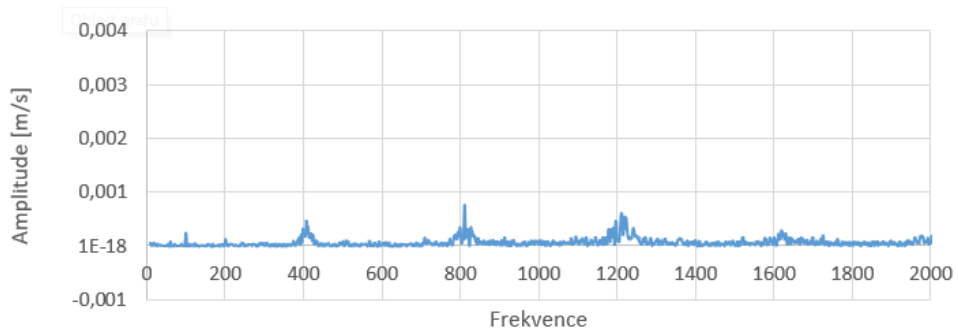
2



3



4



Obr. 4.54 FFT pro jednotlivé nástroje.

Correlations: Rz s; Fa; Fz; Otřep; RMS

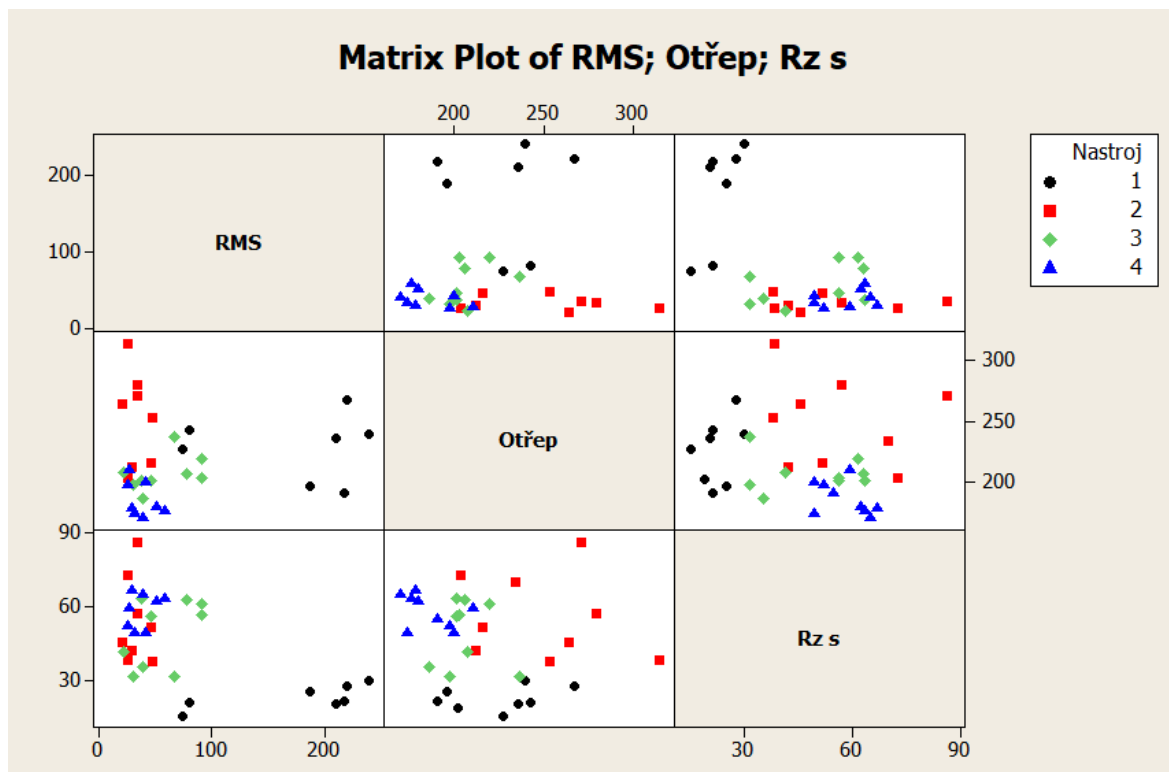
	Rz s	Fa	Fz	Otřep
Fa	0,066 0,707			
Fz	0,618 0,000	0,412 0,014		
Otřep	-0,164 0,347	0,064 0,714	-0,019 0,912	
RMS	-0,556 0,001	-0,343 0,055	-0,746 0,000	0,102 0,579

Cell Contents: Pearson correlation
P-Value

Obr. 4.55 Korelace mezi odezvami.

Nejvyšší závislosti dosahují hodnoty RMS a síly F_z , to odpovídá předpokladu, že vyšší síly v ose Z vyvolají vyšší vibrace, ale závislost není úplná, takže je vyvoditelné, že do procesu vstupují také další proměnné. Je to dáno také charakterem polotovaru a upnutí, kdy ve směru osy Z má nejmenší tuhost, což je typické pro kompozity a jejich obrábění oproti dalším materiálům, které jsou nejčastěji upnuty ve svěráku, nebo upínkami ke stolu obráběcího stroje. Z dalších významnějších interakcí lze určit závislost F_z a R_z , ta je dokonce vyšší než pro sílu F_a při tomto testu nelze porovnat míru ovlivnění, ale pouze podobnost průběhů. Poslední statisticky významnou interakcí je RMS a R_z s což odpovídá zhoršení drsnosti povrchu v případě zvýšení vibrací.

Souhrnné vykreslení parametrů v závislosti na nástrojích je zobrazeno na obrázku 4.56. Je zde dobře viditelné zvýšení hodnot pro nástroj č. 1, který oproti dalším v mnoha oblastech až téměř dvojnásobně překračuje jejich hodnoty.



Obr. 4.56 Vlivy jednotlivých parametrů na RMS, Otřep a R_z .

V tabulce 4.17 jsou shrnuty hlavní účinky a pořadí jejich významnosti dle faktorů. Síla F_a je jako jediná ovlivněna zejména posuvem na otáčku f_n , u všech dalších parametrů je dominantní vliv nástroje a v dalším pořadí pak otáček a posuvu na otáčku. V případě hodnocení otřepů je hlavním faktorem nástroj a další faktory již nejsou statisticky významné, což může poukazovat na náhodou veličinu v měření, nebo malý statistický soubor dat.

Tabulka 4.17 Pořadí účinků podle faktorů.

Úroveň	1	2	3
F_a	f_n	Nastr.	n
F_z	Nastr.	Nastr. vs. f_n	n
R_z	Nastr.	n	f_n
A_o	Nastr.	-	-
RMS	Nastr.	n	Nastr. vs. n

Dílčí závěry

Obrábění kompozitu s přírodními vlákny bylo realizováno s cílem zjistit hlavní faktory, které ovlivňují řezný proces a kvalitu obrobené plochy. Tyto materiály díky 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 PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

Předkládaná habilitační práce se věnuje aktuálním otázkám využití přírodních materiálů v oblasti kompozitů s důrazem na environmentální aspekty. Zvláštní pozornost je věnována průmyslovým aplikacím, kde možnosti využití přírodních vláken nabízejí nejen obnovitelné zdroje materiálů, ale také efektivnější recyklační procesy na konci životního cyklu produktů. Tato práce má klíčový význam pro porozumění vztahům mezi vlastnostmi materiálů a technologiemi výroby a zpracováním kompozitů. Také stanovuje nové vědecké otázky na základě provedených experimentů a dílčích závěrů. Analýza mechanických vlastností ukazuje, že lněné kompozity mohou dosáhnout parametrů srovnatelných s tradičně používanými materiály, jako jsou skelná vlákna. To naznačuje jejich potenciál pro nahrazení těchto materiálů, zejména při využití v hybridních formách, nebo při preferenci jednosměrných vláken. Jednosměrné tkaniny z přírodních vláken jsou lépe manipulovatelné, oproti tkaninám jednosměrným se skleným vláknem. Vlhkost představuje značný nedostatek přírodních vláken z důvodu absorpce vody, což lze částečně řešit aplikací nátěrů a ochranných vrstev. Hybridizace vláken, zkoumaná v této práci, představuje efektivní řešení tohoto problému, zejména kombinací s uhlíkovými vlákny, což vede k výraznému zlepšení výkonnostních parametrů.

Dalším důležitým aspektem je vliv výrobních technologií na porozitu a související vlastnosti materiálů. Metody a analýzy použité v této práci, včetně počítačové tomografie (CT), umožňují doporučit optimální výrobní metodu pro kompozity s přírodními vlákny, konkrétně využití autoklávu v kombinaci s vhodně zvolenou pryskyřicí. Využití kompozitů s přírodními vlákny přináší zlepšení i v dalších oblastech jako je tlumení vibrací a hluku. Testování tlumení bylo provedeno jak v laboratorních, tak reálných podmínkách, kde hybridní kompozity prokázaly schopnost snižování vibrací a hluku, což potvrzuje jejich potenciál pro použití v tlumících a pevnostních aplikacích.

Obrábění těchto materiálů je nedílnou součástí technologie zpracování a má značný vliv na využitelnosti těchto materiálů v průmyslové praxi. Pro hodnocení parametrů ovlivňující samotný řezný proces a kvalitu obrobeneho dílu byly využity metody plánovaného experimentu DOE a jeho statistického vyhodnocení. Na základě těchto metod práce stanovuje úrovně faktorů ovlivňující výsledné parametry a to řezné síly, drsnost povrchu dílce Rz, ale také vliv vibrací a otřepů na finálním dílu. Výstupy práce umožňují lepší návrh plánování a řízení výrobních procesů zpracování KPV materiálů. Experimenty dokládají vhodné řezné podmínky vedoucí k snížení potřeby dalšího postprocesingu dílců.

Na základě vědeckého výzkumu poznatky uvedené v habilitační práci přispívají k rozvoji a posunu této oblasti strojírenské technologie. Výstupy nacházejí uplatnění při zvyšování užitečných vlastností kompozitů s přírodními vlákny a zvyšování efektivity procesů jejich zpracování. Práce je vědeckým příspěvkem, identifikujícím významné činitele procesu výroby těchto materiálů a jejich vlivů na jejich vlastnosti.

Výstupy práce jsou zařazeny do výuky studentů v odborných předmětech, zejména v oblastech strojírenské technologie, výroby plastů a speciálního obrábění, co dokládá její širší význam a aplikaci.

ZÁVĚR

Práce podrobně zkoumá potenciál přírodních vláken jako obnovitelných zdrojů materiálů pro výrobu kompozitů. Bylo prokázáno, že přírodní vlákna mohou částečně nahradit tradiční materiály, jako jsou skelná vlákna, což vede k snížení environmentálního dopadu a usnadnění recyklace na konci životního cyklu produktů. V první teoretické části jsou popsány základní vztahy pro poměry vláken a matrice a jejich vliv na mechaniku kompozitů. Další část navazuje popisem materiálů a výrobních technik využitých dále v praktické části práce, kde jsou teoretické znalosti doplněny praktickými zkušenostmi autora s aplikací jednotlivých materiálů a výrobních metod v průmyslové praxi. Propojení teorie s praxí je důležité z hlediska vhodných návrhů experimentů a vzorků, aby jejich výsledky mohly být snadno aplikovatelné a umožnily vyvozovat vhodné závěry i pro teoretický výzkum. Kapitola o současném stavu poznání se zaměřuje na aktuální zpracování a poznatky z oblasti přírodních vláken, kde jsou popsány metody zpracování, měření a zejména již známé problémy při výrobě, jako je porozita a reakce materiálů na vlhkost. Studiu materiálových vad a diagnostických metod je věnována poslední kapitola.

Experimentálně praktická část práce se zaměřuje na studium jednotlivých vlastností kompozitů s přírodními vlákny a jejich vzájemného propojení pro pochopení zejména návaznosti na použité výrobní technologie a omezení využití finálních dílců v průmyslové praxi. Pro výrobu vzorků byly využity tři hlavní technologie výroby: ruční kladení, VARTM (infuze) a použití prepregů v autoklávu. Pro vyrobené vzorky byla provedena analýza pórovitosti za využití několika dostupných diagnostických metod. Na základě analýz výpočtové, optické mikroskopie a počítačové tomografie bylo doporučeno využití autoklávu jako optimální výrobní metody pro kompozity s přírodními vlákny. Tato metoda zlepšuje jejich porozitu až téměř k nulovým hodnotám pro všechny typy testovaných materiálů, včetně hybridních. Tento přístup má potenciál pro zlepšení výkonnosti a efektivity výrobního procesu, je však náročnější na využívané zařízení.

Mechanické vlastnosti lněných kompozitů byly ověřeny experimentálním měřením a analýza ukazuje, že lněné kompozity dosahují srovnatelných mechanických vlastností se skelnými materiály, jako je pevnost a modul v ohybu, což naznačuje jejich možné široké využití v průmyslových aplikacích. Zvláštní pozornost byla věnována možnosti hybridizace s uhlíkovými vlákny, což výrazně zlepšuje jejich výkonnostní parametry. Vzorky vyrobené v autoklávu dosahují obdobných mechanických vlastností jako vzorky vyrobené infuzí. Ruční laminace se u těchto materiálů ukázala jako nevhodná technologie. Vliv vlhkosti a řešení problematiky absorpce vody byl dále zkoumán. Práce identifikuje absorpci vody jako zásadní nedostatek přírodních vláken. Bylo zjištěno, že použití nátěrů a ochranných vrstev může tento problém částečně zmírnit. Pro zamezení absorpce vody by bylo třeba odolnějších povrchových úprav, které by měly funkci ochranných bariér a následně až další funkce. Hybridizace s uhlíkovými vlákny rovněž představuje efektivní strategii pro minimalizaci negativních účinků vlhkosti.

Využití kompozitů posílených přírodními vlákny (KPV) pro účely tlumení vibrací a hluku bylo zkoumáno v samostatné kapitole, kde byly vyrobeny laboratorní vzorky a měřena přenosová funkce FRF. Tato potvrdila význam využití hybridních materiálů, a proto bylo přistoupeno k výrobě reálných dílců a jejich testování za provozu. Tyto testy potvrdily jak snížení vibrací, tak snížení hluku. Dílec byl krytem motoru elektrického plováku; další využití pro tento účel je nadále testováno.

V poslední kapitole věnované obrábění KPV byl testován vliv jednotlivých nástrojů a řezných podmínek na celý proces. Testy realizované pomocí DOE – plánovaného experimentu byly statisticky vyhodnoceny. Vyhodnoceny byly řezné síly, vibrace, drsnost povrchu a velikost ořepů. Tyto vlastnosti jsou klíčové pro produktivní obrábění a jakost výsledné součásti. Hlavní

vliv byla identifikována geometrie nástroje, následovaná řeznými podmínkami. Na základě získaných dat lze určit ideální podmínky pro různé případy obrábění, kdy mohou být cíle odlišné – od maximálního času po kvalitu povrchu a minimum vibrací (např. při komplikovaném upnutí součásti).

Výstupy a aplikace vyplývající z této práce již byly aplikovány pro vývoj ve společnosti TOMULI s.r.o. kde byl úspěšně realizován projekt zpracování lněných kompozitů pro ŠKODA Motorsport a dále pro interní produkty. V současné době je v realizaci aplikace KPV pro interiérové prvky firmy Eastwander, v rámci OP TAK program Znalostní transfer.

Na ústavu strojírenské technologie VUT v Brně je od r. 2022 zavedena výuka kompozitů do výuky předmětu Plasty ve strojírenství. Ve spolupráci s Leteckým ústavem byl inovován předmět Mechanika kompozitů. V současné době se problematikou technologií a aplikací kompozitních materiálů zabývá výzkumná skupina pod vedením autora práce.

Práce předkládá ucelený pohled na problematiku kompozitů vyztužených přírodními vlákny (KPV) a jejich výroby. Závěry budou sloužit pro hlubší studium jednotlivých kapitol, kdy jsou známy vazby a vlivy jednotlivých vlastností materiálů. Práce navazuje a otevírá spolupráci a uplatnění KPV do výrobní praxe. Obsažené návrhy řešení budou sloužit k úspěšnému využití těchto materiálů v mnoha odvětvích.

Představené výstupy práce budou sloužit k většímu využití těchto materiálů v mnoha odvětvích, především v automobilovém, spotřebním, sportovním a stavebním.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [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. In: . 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] ZOUHAR, Jan. *Kompozitní materiály - Přehled*. Elektronické studijní materiály. 1. Univerzita obrany, 2021.
- [15] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. 2., přeprac. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008. ISBN 978-80-7043-689-9.
- [16] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [17] CAMPBELL, F.C. *Structural Composite Materials*. ASM International, 2010. ISBN 9781615031405. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=D3Wta8e07t0C>.
- [18] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů*. Brno: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky FSI VUT v Brně, 2008.
- [19] JURAČKA, Jaroslav. *Kompozitní konstrukce v letectví*. LU01-2007-OST.ST. Brno: Letecký ústav, FSI VUT v Brně, 2019.
- [20] MAZUMDAR, Sanjay K. *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 0-8493-0585-3.
- [21] JONES, Robert M. *Mechanics of Composite Materials*. 2. Boca Raton: CRC Press, 1999. ISBN 9781315272986. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/9781498711067>.
- [22] KASSAPOGLOU, Christos. *Design and analysis of composite structures: with applications to aerospace structures*. 2nd ed. Aerospace series. Chichester: John Wiley & Sons, 2013. ISBN 978-1-118-40160-6.
- [23] DANIEL, Isaac a ISHAI, Ori. *Engineering mechanics of composite materials*. 2. New York: Oxford University Press, 2006. ISBN 0-19-509738-6.
- [24] PINHEIRO, Daisy. *Use of Composite Materials in Carbon Fiber for the Recovery of Small Slab – Calculation by Analytical and Computational Methods*. ISSN 2166-479X.
- [25] KUEN, Y.Lin. *Composite Materials Overview for Engineers*. William E. Boeing Department of Aeronautics and Astronautics, University of Washington, 2015.
- [26] AL-OQLA, Faris a SALIT, Mohd. Material selection for composites. online. In: *Materials Selection for Natural Fiber Composites*. Elsevier, 2017, s. 73-105. ISBN 9780081009581. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100958-1.00004-9>. [cit. 2021-10-16].
- [27] KOŘÍNEK, Zdeněk. *KOMPOZITY*. online. Praha, 2016. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/>. [cit. 2020-10-16].
- [28] SATHISHKUMAR, TP; SATHEESHKUMAR, S a NAVEEN, J. Glass fiber-reinforced polymer composites – a review. online. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2014, roč. 33, č. 13, s. 1258-1275. ISSN 0731-6844. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0731684414530790>. [cit. 2023-12-30].
- [29] LI, Hong; RICHARDS, Cheryl a WATSON, James. High-Performance Glass Fiber Development for Composite Applications. online. *International Journal of Applied Glass Science*. 2014, roč. 5, č. 1, s. 65-81. ISSN 2041-1286. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/ijag.12053>. [cit. 2023-12-30].
- [30] IBA, H. Optically transparent continuous glass fibre-reinforced epoxy matrix composite: fabrication, optical and mechanical properties. online. *Composites Science and Technology*. roč. 62, č. 15, s. 2043-2052. ISSN 02663538. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00156-2](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00156-2). [cit. 2023-12-30].
- [31] CHAICHANAWONG, Jintawat; THONGCHUEA, Chanchai a AREERAT, Surat. Effect of moisture on the mechanical properties of glass fiber reinforced polyamide

- composites. online. *Advanced Powder Technology*. 2016, roč. 27, č. 3, s. 898-902. ISSN 09218831. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2016.02.006>. [cit. 2023-12-30].
- [32] ALAWSI, Ghydaa; ALDAJAH, Saud a RAHMAAN, Safa. Impact of humidity on the durability of E-glass/polymer composites. online. *Materials & Design*. 2009, roč. 30, č. 7, s. 2506-2512. ISSN 02613069. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.10.002>. [cit. 2023-12-30].
- [33] THOMASON, J.L. Glass fibre sizing: A review. online. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2019, roč. 127. ISSN 1359835X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105619>. [cit. 2023-12-30].
- [34] NASLAIN, R. Carbon Fibers From Pan and Pitch. online. In: WALLEMBERGER, Frederick T.; NASLAIN, Roger; MACCHESNEY, John B.; ACKLER, Harold D. a WALLEMBERGER, Frederick T. (ed.); WALLEMBERGER, Frederick; NASLAIN, Roger; MACCHESNEY, John; ACKLER, Harold; WALLEMBERGER, Frederick. *Advanced Inorganic Fibers*. Materials Technology Series. Boston, MA: Springer US, 1999, s. 233-264. ISBN 978-0-412-60790-5. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8722-8_9. [cit. 2023-12-30].
- [35] ALDOSARI, Salem; KHAN, Muhammad a RAHATEKAR, Sameer. Manufacturing carbon fibres from pitch and polyethylene blend precursors: a review. online. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020, roč. 9, č. 4, s. 7786-7806. ISSN 22387854. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.037>. [cit. 2023-12-30].
- [36] KOUTROUMANIS, Nikos; MANIKAS, Anastasios; PAPPAS, Panagiotis; PETROPOULOS, Faidonas; SYGELLOU, Lamprini et al. A novel mild method for surface treatment of carbon fibres in epoxy-matrix composites. online. *Composites Science and Technology*. 2018, roč. 157, s. 178-184. ISSN 02663538. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.01.048>. [cit. 2023-12-30].
- [37] TIWARI, S. a BIJWE, J. Surface Treatment of Carbon Fibers - A Review. online. *Procedia Technology*. 2014, roč. 14, s. 505-512. ISSN 22120173. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.08.064>. [cit. 2023-12-30].
- [38] GUPTA, Kapil (ed.). *Advanced Manufacturing Technologies*. online. Materials Forming, Machining and Tribology. Cham: Springer International Publishing, 2017. ISBN 978-3-319-56098-4. [cit. 2023-11-02].
- [39] WALLEMBERGER, Frederick; NASLAIN, Roger; MACCHESNEY, John; ACKLER, Harold a WALLEMBERGER, Frederick (ed.). *Advanced Inorganic Fibers*. online. Materials Technology Series. Boston, MA: Springer US, 1999. ISBN 978-0-412-60790-5. [cit. 2023-12-30].
- [40] KURTZ, Steven M. *The UHMWPE Handbook*. online. Amsterdam: Elsevier, 2004. ISBN 9780124298514. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-429851-4.X5000-1>. [cit. 2023-10-21].
- [41] BERÁNKOVÁ, Irena; MIKULÍKOVÁ, Regina a KŘEŠŤAN, Jan. Ballistic efficiency of hybrid laminates based on aramid and UHMWPE prepregs. online. *Manufacturing Technology*. 2022, roč. 21, č. 6, s. 757-761. ISSN 12132489. Dostupné z: <https://doi.org/10.21062/mft.2021.092>. [cit. 2023-11-04].
- [42] WANG, Shicheng; MA, Jinyang; FENG, Xia; CHENG, Jinxue; MA, Xiao et al. An effective surface modification of UHMWPE fiber for improving the interfacial adhesion of epoxy resin composites. online. *Polymer Composites*. 2020, roč. 41, č. 4, s. 1614-1623. ISSN 0272-8397. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/pc.25483>. [cit. 2023-11-04].

- [43] GHOLAMPOUR, A a OZBAKKALOGLU, T. A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications: properties, modification and processing techniques, characterization, applications. *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE*. JAN, roč. 55, č. 3, s. 829-892. ISSN 0022-2461. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03990-y>.
- [44] SHAH, Darshil U. Natural fibre composites: Comprehensive Ashby-type materials selection charts. online. *Materials & Design (1980-2015)*. 2014, roč. 62, s. 21-31. ISSN 02613069. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.05.002>. [cit. 2021-05-10].
- [45] *West systems: Epoxy basics*. online. Dostupné z: <https://www.westsystem.com/instruction-2/epoxy-basics/epoxy-chemistry/>. [cit. 2020-10-16].
- [46] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1. vyd. Brno: VUT, 2003. ISBN 9788021424432.
- [47] JIN, Fan-Long; LI, Xiang a PARK, Soo-Jin. Synthesis and application of epoxy resins: A review. online. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2015, roč. 29, s. 1-11. ISSN 1226086X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.03.026>. [cit. 2023-12-30].
- [48] URBANIAK, MAGDALENA a GRUDZINSKI, KAROL. Time-temperature-transformation (TTT) cure diagram for EPY epoxy system. online. *Polimery*. 2007, roč. 52, č. 02, s. 117-126. ISSN 00322725. Dostupné z: <https://doi.org/10.14314/polimery.2007.117>. [cit. 2021-10-16].
- [49] RAFIQUE, Irum; KAUSAR, Ayesha; ANWAR, Zanib a MUHAMMAD, Bakhtiar. Exploration of Epoxy Resins, Hardening Systems, and Epoxy/Carbon Nanotube Composite Designed for High Performance Materials: A Review. online. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 2015, roč. 55, č. 3, s. 312-333. ISSN 0360-2559. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/03602559.2015.1070874>. [cit. 2023-12-30].
- [50] UNNIKRISHNAN, K. a THACHIL, Eby. Toughening of epoxy resins. online. *Designed Monomers and Polymers*. 2012, roč. 9, č. 2, s. 129-152. ISSN 1568-5551. Dostupné z: <https://doi.org/10.1163/156855506776382664>. [cit. 2023-12-30].
- [51] JOHNSON, R.; ARUMUGAPRABU, V. a KO, Tae. Mechanical Property, Wear Characteristics, Machining and Moisture Absorption Studies on Vinyl Ester Composites – a Review. online. *Silicon*. 2019, roč. 11, č. 5, s. 2455-2470. ISSN 1876-990X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12633-018-9828-x>. [cit. 2023-12-30].
- [52] *Thermoplastics in Aerospace Composites Outlook, 2014-2023*. online. Composites world, 2014. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/the-outlook-for-thermoplastics-in-aerospace-composites-2014-2023>. [cit. 2020-10-16].
- [53] Thermosetting Composites - Processing. online. *AZO Materials*. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=352>. [cit. 2021-10-23].
- [54] GOH, Guo; YAP, Yee; AGARWALA, Shweta a YEONG, Wai. Recent Progress in Additive Manufacturing of Fiber Reinforced Polymer Composite. online. *Advanced Materials Technologies*. 2019, roč. 4, č. 1. ISSN 2365709X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/admt.201800271>. [cit. 2021-10-23].
- [55] HexPly Prepreg Technology. online. In: . s. 1-35. Dostupné z: https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Prepreg_Technology.pdf. [cit. 2021-10-23].
- [56] Guide to composites. CD-ROM. *SP Systems: Structural Polymer Systems Limited*. roč. 2001.

- [57] GOKCE, A a ADVANI, S. Modeling, optimization and control of resin flow during manufacturing of textile composites with liquid molding. online. In: *Design and Manufacture of Textile Composites*. Elsevier, 2005, s. 242-291. ISBN 9781855737440. Dostupné z: <https://doi.org/10.1533/9781845690823.242>. [cit. 2021-10-23].
- [58] *Resin Transfer Moulding*. online. UK: Composite Integration, 2020. Dostupné také z: <https://composite-integration.co.uk/resin-transfer-moulding/>.
- [59] *Composite materials guide*. online. NetComposites, 2019. Dostupné také z: <https://netcomposites.com/guide/manufacturing>.
- [60] *Technical data sheet: Prepregs DT120*. Parma: Deltatech, 2015.
- [61] HUBERT, P.; FERNLUND, G. a POURSARTIP, A. Autoclave processing for composites. online. In: *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)*. Elsevier, 2012, s. 414-434. ISBN 9780857090676. Dostupné z: <https://doi.org/10.1533/9780857096258.3.414>.
- [62] *Selection Guide to prepreg process*. online. In: Airtech.lu. Dostupné z: https://airtech.lu/sites/default/files/prepreg_autoclave/prepregTo275F.pdf. [cit. 2021-10-23].
- [63] 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].
- [64] 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].
- [65] 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].
- [66] 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].
- [67] 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].
- [68] 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].
- [69] 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>.
- [70] 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].
- [71] 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].
- [72] 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].
- [73] 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].
- [74] 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].
- [75] 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].
- [76] 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].
- [77] LI, Xue; TABIL, Lope a PANIGRAHI, Satyanarayan. Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber-Reinforced Composites: A Review. online. *Journal of Polymers and the Environment*. 2007, roč. 15, č. 1, s. 25-33. ISSN 1566-2543. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10924-006-0042-3>. [cit. 2022-08-27].
- [78] VOTRUBOVÁ, Olga. *Anatomie rostlin*. 3., přeprac. vyd. Praha: Karolinum, 2010. ISBN 978-80-246-1867-8.
- [79] EICHHORN, S.J. a YOUNG, R.J. Composite micromechanics of hemp fibres and epoxy resin microdroplets. online. *Composites Science and Technology*. 2004, roč. 64, č. 5, s. 767-772. ISSN 02663538. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2003.08.002>. [cit. 2022-08-27].
- [80] GOUDENHOOFT, 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].
- [81] LI, Qian; LI, Yan a ZHOU, Limin. Nanoscale evaluation of multi-layer interfacial mechanical properties of sisal fiber reinforced composites by nanoindentation technique. online. *Composites Science and Technology*. 2017, roč. 152, s. 211-221.

- ISSN 02663538. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.09.030>. [cit. 2022-08-27].
- [82] PICKERING, K.L.; EFENDY, M.G. a LE, T.M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. online. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2016, roč. 83, s. 98-112. ISSN 1359835X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038>. [cit. 2022-08-27].
- [83] 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].
- [84] GASSAN, J. Effects of corona discharge and UV treatment on the properties of jute-fibre epoxy composites. online. *Composites Science and Technology*. roč. 60, č. 15, s. 2857-2863. ISSN 02663538. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(00\)00168-8](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00168-8). [cit. 2022-08-27].
- [85] PAWIOWSKA, Alona; STEPCZYŃSKA, Magdalena a WALCZAK, Maciej. Flax fibres modified with a natural plant agent used as a reinforcement for the polylactide-based biocomposites. online. *Industrial Crops and Products*. 2022, roč. 184. ISSN 09266690. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115061>. [cit. 2022-08-27].
- [86] LAMM, Meghan; LI, Kai; KER, Darby; ZHAO, Xianhui; HINTON, H. et al. Exploiting chitosan to improve the interface of nanocellulose reinforced polymer composites. online. *Cellulose*. 2022, roč. 29, č. 7, s. 3859-3870. ISSN 0969-0239. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04327-2>. [cit. 2022-08-27].
- [87] DHAKAL, H; ZHANG, Z a RICHARDSON, M. Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites. online. *Composites Science and Technology*. 2007, roč. 67, č. 7-8, s. 1674-1683. ISSN 02663538. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.06.019>. [cit. 2022-08-27].
- [88] JOSEPH, P.V; RABELLO, Marcelo; MATTOSO, L.H.C; JOSEPH, Kuruvilla a THOMAS, Sabu. Environmental effects on the degradation behaviour of sisal fibre reinforced polypropylene composites. online. *Composites Science and Technology*. 2002, roč. 62, č. 10-11, s. 1357-1372. ISSN 02663538. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00080-5](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00080-5). [cit. 2022-08-27].
- [89] AZWA, Z.N.; YOUSIF, B.F.; MANALO, A.C. a KARUNASENA, W. A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. online. *Materials & Design*. 2013, roč. 47, s. 424-442. ISSN 02613069. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.11.025>. [cit. 2022-08-27].
- [90] ABDEL-HAKIM, Ahmed; EL-WAKIL, Abd; EL-MOGY, Soma a HALIM, Sawsan. Effect of fiber coating on the mechanical performance, water absorption and biodegradability of sisal fiber/natural rubber composite. online. *Polymer International*. 2021, roč. 70, č. 9, s. 1356-1366. ISSN 0959-8103. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/pi.6207>. [cit. 2022-08-27].
- [91] LIU, Zengshe a TISSERAT, Brent. Coating applications to natural fiber composites to improve their physical, surface and water absorption characters. online. *Industrial Crops and Products*. 2018, roč. 112, s. 196-199. ISSN 09266690. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.002>. [cit. 2022-08-27].
- [92] BHOOPATHI, R.; DEEPA, C.; SASIKALA, G. a RAMESH, M. Experimental Investigation on Mechanical Properties of Hemp-Banana-Glass Fiber Reinforced

- Composites. online. *Applied Mechanics and Materials*. 2015, roč. 766-767, s. 167-172. ISSN 1662-7482. Dostupné z: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.766-767.167>. [cit. 2022-09-17].
- [93] ATMAKURI, Ayyappa; PALEVICIUS, Arvydas; SIDDABATHULA, Madhusudan; VILKAUSKAS, Andrius a JANUSAS, Giedrius. Analysis of Mechanical and Wettability Properties of Natural Fiber-Reinforced Epoxy Hybrid Composites. online. *Polymers*. 2020, roč. 12, č. 12. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym12122827>. [cit. 2022-09-17].
- [94] BOLCU, Dumitru a STĂNESCU, Marius. A Study of the Mechanical Properties of Composite Materials with a Dammar-Based Hybrid Matrix and Two Types of Flax Fabric Reinforcement. online. *Polymers*. 2020, roč. 12, č. 8. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym12081649>. [cit. 2022-09-17].
- [95] APOLINARIO, Guilherme; IENNY, Patrick; CORN, Stéphane; LÉGER, Romain; BERGERET, Anne et al. Effects of Water Ageing on the Mechanical Properties of Flax and Glass Fibre Composites: Degradation and Reversibility. online. In: FANGUEIRO, Raul a RANA, Sohel (ed.); FANGUEIRO, Raul; RANA, Sohel. *Natural Fibres: Advances in Science and Technology Towards Industrial Applications*. RILEM Bookseries. Dordrecht: Springer Netherlands, 2016, s. 183-196. ISBN 978-94-017-7513-7. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-94-017-7515-1_14. [cit. 2021-05-10].
- [96] FAIRLIE, George a NJUGUNA, James. Damping Properties of Flax/Carbon Hybrid Epoxy/Fibre-Reinforced Composites for Automotive Semi-Structural Applications. online. *Fibers*. 2020, roč. 8, č. 10. ISSN 2079-6439. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/fib8100064>. [cit. 2021-06-18].
- [97] MAHMOUDI, S.; KERVOELEN, A.; ROBIN, G.; DUIGOU, L.; DAYA, E.M. et al. Experimental and numerical investigation of the damping of flax–epoxy composite plates. online. *Composite Structures*. 2019, roč. 208, s. 426-433. ISSN 02638223. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.030>. [cit. 2021-05-20].
- [98] PHILLIPS, Steven; BAETS, Joris; LESSARD, Larry; HUBERT, Pascal a VERPOEST, Ignaas. Characterization of flax/epoxy prepregs before and after cure. online. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2013, roč. 32, č. 11, s. 777-785. ISSN 0731-6844. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0731684412473359>. [cit. 2022-09-17].
- [99] CORBIN, A; SOULAT, D; FERREIRA, M; LABANIEH, A; GABRION, X et al. Multi-scale analysis of flax fibres woven fabrics for composite applications. online. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, roč. 406. ISSN 1757-899X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/406/1/012016>. [cit. 2022-09-17].
- [100] ALI, Yeasin; FAISAL, Atik; SAIFULLAH, Abu; DHAKAL, Hom; ALIMUZZAMAN, Shah et al. Fabrication and Mechanical Performance of Non-Crimp Unidirectional Jute-Yarn Preform-Based Composites. online. *Molecules*. 2021, roč. 26, č. 21. ISSN 1420-3049. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/molecules26216664>. [cit. 2022-09-17].
- [101] HO, Mei-po; WANG, Hao; LEE, Joong-Hee; HO, Chun-kit; LAU, Kin-tak et al. Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites. online. *Composites Part B: Engineering*. 2012, roč. 43, č. 8, s. 3549-3562. ISSN 13598368. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.10.001>. [cit. 2022-09-17].

- [102] PRASAD, Vishnu; MUHAMMED HUNIZE, C.; ABHIRAJ, R.; JOSPEH, M.; SEKAR, K. et al. Mechanical Properties of Flax Fiber Reinforced Composites Manufactured Using Hand Layup and Compression Molding—A Comparison. online. In: SHANKER, Kripa; SHANKAR, Ravi a SINDHWANI, Rahul (ed.); SHANKER, Kripa; SHANKAR, Ravi; SINDHWANI, Rahul. *Advances in Industrial and Production Engineering*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Singapore: Springer Singapore, 2019, s. 781-789. ISBN 978-981-13-6411-2. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-981-13-6412-9_72. [cit. 2022-09-17].
- [103] BILLAH, Md.; RABBI, Md. a HASAN, Afnan. A Review on Developments in Manufacturing Process and Mechanical Properties of Natural Fiber Composites. online. *Journal of Engineering Advancements*. 2021, roč. 2, č. 01, s. 13-23. ISSN 2708-6437. Dostupné z: <https://doi.org/10.38032/jea.2021.01.003>. [cit. 2022-09-17].
- [104] SYMINGTON, Mark; DAVID-WEST, Opukuro; BANKS, William; THOMASON, J.L. a PETHRICK, Richard. Vacuum infusion of natural fibre composites for structural applications. In: *13th European Conference on Composite Materials (EECM 13)*. Stockholm, Sweden, 2008, s. -2. Dostupné také z: http://extra.ivf.se/eccm13_programme/abstracts/220.pdf.
- [105] DHIMOLE, Vivek; SERRAO, Pruthvi a CHO, Chongdu. Review and Suggestion of Failure Theories in Voids Scenario for VARTM Processed Composite Materials. online. *Polymers*. 2021, roč. 13, č. 6. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym13060969>. [cit. 2022-09-17].
- [106] SREEKUMAR, P.A.; JOSEPH, Kuruvilla; UNNIKRISHNAN, G. a THOMAS, Sabu. A comparative study on mechanical properties of sisal-leaf fibre-reinforced polyester composites prepared by resin transfer and compression moulding techniques. online. *Composites Science and Technology*. 2007, roč. 67, č. 3-4, s. 453-461. ISSN 02663538. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.08.025>. [cit. 2022-09-17].
- [107] VAN VOORN, B; SMIT, H.H.G; SINKE, R.J a DE KLERK, B. Natural fibre reinforced sheet moulding compound. online. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2001, roč. 32, č. 9, s. 1271-1279. ISSN 1359835X. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(01\)00085-9](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(01)00085-9). [cit. 2022-09-17].
- [108] SABISTON, Trevor; INAL, Kaan a LEE-SULLIVAN, Pearl. Application of Artificial Neural Networks to predict fibre orientation in long fibre compression moulded composite materials. online. *Composites Science and Technology*. 2020, roč. 190. ISSN 02663538. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108034>. [cit. 2022-09-17].
- [109] LENGSELD, Hauke; LACALLE, Javier; NEUMEYER, Thomas a ALTSTÄDT, Volker. *Composite Technology*. online. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2021. ISBN 978-1-56990-825-9. Dostupné z: <https://doi.org/10.3139/9781569908266>. [cit. 2022-09-17].
- [110] MISRI, S.; ISHAK, M.; SAPUAN, S. a LEMAN, Z. Filament Winding Process for Kenaf Fibre Reinforced Polymer Composites. online. In: SALIT, Mohd Sapuan; JAWAID, Mohammad; YUSOFF, Nukman Bin a HOQUE, M. Enamul (ed.); SALIT, Mohd; JAWAID, Mohammad; YUSOFF, Nukman; HOQUE, M. *Manufacturing of Natural Fibre Reinforced Polymer Composites*. Cham: Springer International Publishing, 2015, s. 369-383. ISBN 978-3-319-07943-1. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-319-07944-8_18. [cit. 2022-09-17].
- [111] ANSARI, Suriyati; RUZAIDI, Che a HUSIN, Kamarudin. Review on the Application of Natural Fiber Composite via Filament Winding Using Different Resin. online. *Key*

- Engineering Materials*. 2015, roč. 660, s. 120-124. ISSN 1662-9795. Dostupné z: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.660.120>. [cit. 2022-09-17].
- [112] BALEY, Christophe; KERVOËLEN, Antoine; LAN, Marine; CARTIÉ, Denis; LE DUIGOU, Antoine et al. Flax/PP manufacture by automated fibre placement (AFP). online. *Materials & Design*. 2016, roč. 94, s. 207-213. ISSN 02641275. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.011>. [cit. 2022-09-17].
- [113] BHAGIA, Samarthyaa; BORNANI, Kamlesh; AGRAWAL, Ruchi; SATLEWAL, Alok; ĐURKOVIČ, Jaroslav et al. Critical review of FDM 3D printing of PLA biocomposites filled with biomass resources, characterization, biodegradability, upcycling and opportunities for biorefineries. online. *Applied Materials Today*. 2021, roč. 24. ISSN 23529407. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2021.101078>. [cit. 2022-09-28].
- [114] LE DUIGOU, Antoine; CORREA, David; UEDA, Masahito; MATSUZAKI, Ryosuke a CASTRO, Mickael. A review of 3D and 4D printing of natural fibre biocomposites. online. *Materials & Design*. 2020, roč. 194. ISSN 02641275. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108911>. [cit. 2022-09-28].
- [115] KABIR, S; MATHUR, Kavita a SEYAM, Abdel-Fattah. A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties. online. *Composite Structures*. 2020, roč. 232. ISSN 02638223. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111476>. [cit. 2022-09-28].
- [116] MASHAYEKHI, Fatemeh; BARDON, Julien; BERTHÉ, Vincent; PERRIN, Henri; WESTERMANN, Stephan et al. Fused Filament Fabrication of Polymers and Continuous Fiber-Reinforced Polymer Composites: Advances in Structure Optimization and Health Monitoring. online. *Polymers*. 2021, roč. 13, č. 5. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym13050789>. [cit. 2022-09-28].
- [117] ABDUROHMAN, K; SATRIO, T; MUZAYADAH, N a TETEN, . A comparison process between hand lay-up, vacuum infusion and vacuum bagging method toward e-glass EW 185/lycal composites. online. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, roč. 1130. ISSN 1742-6588. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1130/1/012018>. [cit. 2022-09-17].
- [118] AL-OQLA, Faris M.; SALIT, Mohd Sapuan; ISHAK, Mohamad Ridzwan a AZIZ, Nuraini Abdul. Selecting natural fibers for bio-based materials with conflicting criteria. online. *American journal of applied sciences*. 2015, roč. 12, č. 1, s. 64-71. ISSN 1546-9239. Dostupné z: <https://doi.org/10.3844/ajassp.2015.64.71>. [cit. 2024-02-16].
- [119] *Committee D30 on Composite Materials. ASTM International - Standards Worldwide*. online. In: ASTM International. Dostupné z: <https://www.astm.org/get-involved/technical-committees/committee-d30>. [cit. 2022-09-28].
- [120] HODGKINSON, John M. *Mechanical Testing of Advanced Fibre Composites*. 1.st. Woodhead Publishing, 2000. ISBN 1855733129.
- [121] MAHBOOB, Zia; EL SAWI, Ihab; ZDERO, Radovan; FAWAZ, Zouheir a BOUGHERARA, Habiba. Tensile and compressive damaged response in Flax fibre reinforced epoxy composites. online. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2017, roč. 92, s. 118-133. ISSN 1359835X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.11.007>. [cit. 2021-09-17].
- [122] BENKHELLADI, Asma; LAOUICI, Hamdi a BOUCHOUCHA, Ali. Tensile and flexural properties of polymer composites reinforced by flax, jute and sisal fibres. online. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020, roč.

- 108, č. 3, s. 895-916. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05427-2>. [cit. 2022-09-28].
- [123] DINESH, M.; ASOKAN, R.; VIGNESH, S.; KUMAR, Chitikena a RAVICHAND, Rajulapati. Experimental Investigation on Mechanical Properties of Carbon-Flax-Glass Hybrid Composites. online. *International Journal of Vehicle Structures*. 2020, roč. 12, č. 1, s. 1-8. ISSN 09753060. Dostupné z: <https://doi.org/10.4273/ijvss.12.1.01>. [cit. 2021-05-20].
- [124] SARKAR, Forkan; AKONDA, Mahmudul a SHAH, Darshil. Mechanical Properties of Flax Tape-Reinforced Thermoset Composites. online. *Materials*. 2020, roč. 13, č. 23. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma13235485>. [cit. 2022-09-28].
- [125] BACHMANN, Jens; WIEDEMANN, Martin a WIERACH, Peter. Flexural Mechanical Properties of Hybrid Epoxy Composites Reinforced with Nonwoven Made of Flax Fibres and Recycled Carbon Fibres. *Aerospace*. 2018, roč. 5, č. 4. ISSN 2226-4310. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/aerospace5040107>.
- [126] MOUDOOD, Abdul; RAHMAN, Anisur; ÖCHSNER, Andreas; ISLAM, Md; ALI, Mohammad et al. Effects of Different Relative Humidities on Flax Fibers prior to Manufacturing Their Composites Based on the Shear Response. online. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020, roč. 2020, s. 1-7. ISSN 1687-8434. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2020/4785970>. [cit. 2022-09-28].
- [127] STRUNGAR, E.; YANKIN, A.; ZUBOVA, E.; BABUSHKIN, A. a DUSHKO, A. Experimental study of shear properties of 3D woven composite using digital image correlation and acoustic emission. online. *Acta Mechanica Sinica*. 2020, roč. 36, č. 2, s. 448-459. ISSN 0567-7718. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10409-019-00921-7>. [cit. 2021-05-25].
- [128] VOLEK, A a ZOUHAR, J. *Optical methods in use by experimental strain measurement: PROCEEDINGS OF THE 48TH INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON EXPERIMENTAL NI ANALYZA NAPETI 2010 EXPERIMENTAL STRESS ANALYSIS*. 1. Velke Losiny, CZECH REPUBLIC, 2010. ISBN 978-80-244-2533-7.
- [129] ZHANG, Yongli; LI, Yan; MA, Hao a YU, Tao. Tensile and interfacial properties of unidirectional flax/glass fiber reinforced hybrid composites. *Composites Science and Technology*. 2013, roč. 88, s. 172-177. ISSN 0266-3538. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.08.037>.
- [130] YAO, Jiangwei a YU, Weidong. Tensile strength and its variation for PAN-based carbon fibers. II. Calibration of the variation from testing. online. *Journal of Applied Polymer Science*. 2007, roč. 104, č. 4, s. 2625-2632. ISSN 00218995. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/app.24455>. [cit. 2022-09-28].
- [131] CHI, Zhifan; CHOU, Tsu a SHEN, Guoyi. Determination of single fibre strength distribution from fibre bundle testings. *Journal of Materials Science*. 1984, roč. 19, č. 10, s. 3319-3324. ISSN 1573-4803. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BF00549820>.
- [132] BENSADOUN, F; VERPOEST, I; BAETS, J; MÜSSIG, J; GRAUPNER, N et al. Impregnated fibre bundle test for natural fibres used in composites. online. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2017, roč. 36, č. 13, s. 942-957. ISSN 0731-6844. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0731684417695461>. [cit. 2022-09-28].
- [133] KERSANI, Malika; LOMOV, Stepan; VAN VUURE, Aart; BOUABDALLAH, Ahcène a VERPOEST, Ignaas. Damage in flax/epoxy quasi-unidirectional woven laminates under quasi-static tension. online. *Journal of Composite Materials*. 2015,

- roč. 49, č. 4, s. 403-413. ISSN 0021-9983. Dostupné z:
<https://doi.org/10.1177/0021998313519282>. [cit. 2022-09-28].
- [134] KNOELLER, Stephanie a ROME, NY. Polymer matrix composite manufacturing induced defects. *Advanced Materials, Manufacturing and Testing*. 2009, roč. 5, s. 7-10.
- [135] BOWKETT, Mark a THANAPALAN, Kary. Comparative analysis of failure detection methods of composites materials' systems. online. *Systems Science & Control Engineering*. 2017, roč. 5, č. 1, s. 168-177. ISSN 2164-2583. Dostupné z:
<https://doi.org/10.1080/21642583.2017.1311240>. [cit. 2022-09-28].
- [136] STRUZZIERO, G.; TEUWEN, J.J.E. a SKORDOS, A.A. Numerical optimisation of thermoset composites manufacturing processes: A review. online. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2019, roč. 124. ISSN 1359835X. Dostupné z:
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105499>. [cit. 2022-09-28].
- [137] WISNOM, M.R.; GIGLIOTTI, M.; ERSOY, N.; CAMPBELL, M. a POTTER, K.D. Mechanisms generating residual stresses and distortion during manufacture of polymer–matrix composite structures. online. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2006, roč. 37, č. 4, s. 522-529. ISSN 1359835X. Dostupné z:
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.05.019>. [cit. 2022-09-28].
- [138] PARLEVLIT, Patricia; BERSEE, Harald a BEUKERS, Adriaan. Residual stresses in thermoplastic composites – a study of the literature. Part III: Effects of thermal residual stresses. online. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2007, roč. 38, č. 6, s. 1581-1596. ISSN 1359835X. Dostupné z:
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2006.12.005>. [cit. 2022-09-28].
- [139] TIMMERMAN, John; HAYES, Brian a SEFERIS, James. Cure temperature effects on cryogenic microcracking of polymeric composite materials. online. *Polymer Composites*. 2003, roč. 24, č. 1, s. 132-139. ISSN 0272-8397. Dostupné z:
<https://doi.org/10.1002/pc.10013>. [cit. 2022-09-28].
- [140] FU, Yutong a YAO, Xuefeng. A review on manufacturing defects and their detection of fiber reinforced resin matrix composites. online. *Composites Part C: Open Access*. 2022, roč. 8. ISSN 26666820. Dostupné z:
<https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100276>. [cit. 2022-09-28].
- [141] FERNLUND, G; WELLS, J; FAHRANG, L; KAY, J a POURSAARTIP, A. Causes and remedies for porosity in composite manufacturing. online. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, roč. 139. ISSN 1757-8981. Dostupné z:
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/139/1/012002>. [cit. 2022-10-08].
- [142] HAKIM, Issa; DONALDSON, Steven; MEYENDORF, Norbert a BROWNING, Charles. Porosity Effects on Interlaminar Fracture Behavior in Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites. online. *Materials Sciences and Applications*. 2017, roč. 08, č. 02, s. 170-187. ISSN 2153-117X. Dostupné z:
<https://doi.org/10.4236/msa.2017.82011>. [cit. 2022-10-08].
- [143] MADSEN, Bo; THYGESEN, Anders a LILHOLT, Hans. Plant fibre composites – porosity and stiffness. online. *Composites Science and Technology*. 2009, roč. 69, č. 7-8, s. 1057-1069. ISSN 02663538. Dostupné z:
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.01.016>. [cit. 2022-10-08].
- [144] CHARLET, K.; BAILEY, C.; MORVAN, C.; JERNOT, J.P.; GOMINA, M. et al. Characteristics of Hermès flax fibres as a function of their location in the stem and properties of the derived unidirectional composites. online. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2007, roč. 38, č. 8, s. 1912-1921. ISSN

- 1359835X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.03.006>. [cit. 2022-10-08].
- [145] LE DUGOU, Antoine; REQUILE, Samuel; BEAUGRAND, Johnny; SCARPA, Fabrizio a CASTRO, Mickael. Natural fibres actuators for smart bio-inspired hygromorph biocomposites. online. *Smart Materials and Structures*. 2017, roč. 26, č. 12. ISSN 0964-1726. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa9410>. [cit. 2022-10-08].
- [146] 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 02663538. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00097-6](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00097-6). [cit. 2022-10-08].
- [147] MADUEKE, Chioma; MBAH, Oguejiofor a UMUNAKWE, Reginald. A review on the limitations of natural fibres and natural fibre composites with emphasis on tensile strength using coir as a case study. online. *Polymer Bulletin*. ISSN 0170-0839. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04241-y>. [cit. 2022-10-08].
- [148] GAGER, Victor; LE DUGOU, Antoine; BOURMAUD, Alain; PIERRE, Florian; BEHLOULI, Karim et al. Understanding the effect of moisture variation on the hygromechanical properties of porosity-controlled nonwoven biocomposites. online. *Polymer Testing*. 2019, roč. 78. ISSN 01429418. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.105944>. [cit. 2022-10-08].
- [149] JOLLIVET, Thomas; PEYRAC, Catherine a LEFEBVRE, Fabien. Damage of Composite Materials. online. *Procedia Engineering*. 2013, roč. 66, s. 746-758. ISSN 18777058. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.128>. [cit. 2023-03-25].
- [150] GAO, Xingzhong; UMAIR, Muhammad; NAWAB, Yasir; LATIF, Zeeshan; AHMAD, Sheraz et al. Mode I Fatigue of Fibre Reinforced Polymeric Composites: A Review. online. *Polymers*. 2022, roč. 14, č. 21. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym14214558>. [cit. 2023-03-25].
- [151] WANG, Bing; ZHONG, Shuncong; LEE, Tung-Lik; FANCEY, Kevin a MI, Jiawei. Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: A state-of-the-art review. online. *Advances in Mechanical Engineering*. 2020, roč. 12, č. 4. ISSN 1687-8140. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/1687814020913761>. [cit. 2023-03-25].
- [152] WANG, Bing a FANCEY, Kevin. Viscoelastically prestressed polymeric matrix composites: An investigation into fibre deformation and prestress mechanisms. online. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2018, roč. 111, s. 106-114. ISSN 1359835X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.05.013>. [cit. 2023-03-25].
- [153] AL-HAJAJ, Zainab; ZDERO, Radovan a BOUGHERARA, Habiba. Tensile fatigue response of a novel carbon/flax/epoxy hybrid composite under strain-controlled and stress-controlled amplitude. online. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2021, roč. 235, č. 11, s. 2588-2599. ISSN 1464-4207. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/14644207211028968>. [cit. 2023-03-25].
- [154] SIDDIQUE, Amna; ABID, Sharjeel; SHAFIQ, Faizan; NAWAB, Yasir; WANG, Hailou et al. Mode I fracture toughness of fiber-reinforced polymer composites: A review. online. *Journal of Industrial Textiles*. 2021, roč. 50, č. 8, s. 1165-1192. ISSN 1528-0837. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/1528083719858767>. [cit. 2023-03-25].

- [155] MAO, H a MAHADEVAN, S. Fatigue damage modelling of composite materials. online. *Composite Structures*. 2002, roč. 58, č. 4, s. 405-410. ISSN 02638223. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(02\)00126-5](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(02)00126-5). [cit. 2023-03-26].
- [156] VAN PAEPEGEM, W. A new coupled approach of residual stiffness and strength for fatigue of fibre-reinforced composites. online. *International Journal of Fatigue*. roč. 24, č. 7, s. 747-762. ISSN 01421123. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(01\)00194-3](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(01)00194-3). [cit. 2023-03-26].
- [157] *ASM Handbook*. Materials Park: ASM International, 2001. ISBN 978-0-87170-703-1.
- [158] FOTOUH, Ahmed; WOŁODKO, John a LIPSETT, Michael. Fatigue of natural fiber thermoplastic composites. online. *Composites Part B: Engineering*. 2014, roč. 62, s. 175-182. ISSN 13598368. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.02.023>. [cit. 2023-03-26].
- [159] GASSAN, Jochen. A study of fibre and interface parameters affecting the fatigue behaviour of natural fibre composites. online. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2002, roč. 33, č. 3, s. 369-374. ISSN 1359835X. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(01\)00116-6](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(01)00116-6). [cit. 2023-03-26].
- [160] MISRA, M.; AHANKARI, S.S.; MOHANTY, A.K. a NGA, A.D. Creep and fatigue of natural fibre composites. online. In: *Interface Engineering of Natural Fibre Composites for Maximum Performance*. Elsevier, 2011, s. 289-340. ISBN 9781845697426. Dostupné z: <https://doi.org/10.1533/9780857092281.2.289>. [cit. 2023-03-26].
- [161] SARASINI, F. a SANTULLI, C. Non-destructive testing (NDT) of natural fibre composites: acoustic emission technique. online. In: *Natural Fibre Composites*. Elsevier, 2014, s. 273-302. ISBN 9780857095244. Dostupné z: <https://doi.org/10.1533/9780857099228.3.273>. [cit. 2023-04-01].
- [162] CHEN, Jian; YU, Zhenyang a JIN, Haoran. Nondestructive testing and evaluation techniques of defects in fiber-reinforced polymer composites: A review. online. *Frontiers in Materials*. 2022, roč. 9. ISSN 2296-8016. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.986645>. [cit. 2023-04-01].
- [163] WRÓBEL, Gabriel a PAWLAK, Sebastian. A comparison study of the pulse-echo and through-transmission ultrasonics in glass/epoxy composites. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2007, roč. 22.
- [164] LOGANATHAN, Tamil; SULTAN, Mohamed a GOBALAKRISHNAN, Mohana. Ultrasonic inspection of natural fiber-reinforced composites. online. In: *Sustainable Composites for Aerospace Applications*. Elsevier, 2018, s. 227-251. ISBN 9780081021316. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102131-6.00011-6>. [cit. 2023-04-01].
- [165] EL-SABBAGH, A.; STEUERNAGEL, L. a ZIEGMANN, G. Ultrasonic testing of natural fibre polymer composites: effect of fibre content, humidity, stress on sound speed and comparison to glass fibre polymer composites. online. *Polymer Bulletin*. 2013, roč. 70, č. 2, s. 371-390. ISSN 0170-0839. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00289-012-0797-8>. [cit. 2023-04-01].
- [166] LOGANATHAN, Tamil; SULTAN, Mohamed; MUHAMMAD AMIR, Siti; JAMIL, Jeffry; YUSOF, Mohd et al. Infrared Thermographic and Ultrasonic Inspection of Randomly-Oriented Short-Natural Fiber-Reinforced Polymeric Composites. online. *Frontiers in Materials*. 2021, roč. 7. ISSN 2296-8016. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.604459>. [cit. 2023-04-01].

- [167] AMIR, Siti; SULTAN, M.T.H.; JAWAID, Mohammad; ARIFFIN, Ahmad; MOHD, Shukri et al. Nondestructive testing method for Kevlar and natural fiber and their hybrid composites. online. In: *Durability and Life Prediction in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*. Elsevier, 2019, s. 367-388. ISBN 9780081022900. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102290-0.00016-7>. [cit. 2023-04-01].
- [168] ZHANG, Hai; SFARRA, Stefano; SARASINI, Fabrizio; SANTULLI, Carlo; FERNANDES, Henrique et al. Thermographic Non-Destructive Evaluation for Natural Fiber-Reinforced Composite Laminates. online. *Applied Sciences*. 2018, roč. 8, č. 2. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app8020240>. [cit. 2023-04-01].
- [169] DE OLIVEIRA, Bernardo; NIENHEYSEN, Philipp; BALDO, Crhistian; GONÇALVES, Armando a SCHMITT, Robert. Improved impact damage characterisation in CFRP samples using the fusion of optical lock-in thermography and optical square-pulse shearography images. online. *NDT & E International*. 2020, roč. 111. ISSN 09638695. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102215>. [cit. 2023-04-01].
- [170] BENSADOUN, Farida; BARBURSKI, Marcin; STRAUMIT, Ilya; TRAN, Le; FUENTES, Carlos et al. *Challenges of X-ray Tomography Technique on Natural Fibre-Based Composites: 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014)*. Prague, 2014. ISSN ISSN 1435-4934.
- [171] TAN, K.T.; WATANABE, N. a IWAHORI, Y. X-ray radiography and micro-computed tomography examination of damage characteristics in stitched composites subjected to impact loading. online. *Composites Part B: Engineering*. 2011, roč. 42, č. 4, s. 874-884. ISSN 13598368. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.01.011>. [cit. 2023-04-10].
- [172] JAQUES, Victory; PLESSIS, Anton; ZEMEK, Marek; ŠALPLACHTA, Jakub; STUBIANOVÁ, Zuzana et al. Review of porosity uncertainty estimation methods in computed tomography dataset. online. *Measurement Science and Technology*. 2021, roč. 32, č. 12. ISSN 0957-0233. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac1b40>. [cit. 2023-04-10].
- [173] ČELKO, L.; GUTIÉRREZ-CANO, V.; CASAS-LUNA, M.; MATULA, J.; OLIVER-URRUTIA, C. et al. Characterization of porosity and hollow defects in ceramic objects built by extrusion additive manufacturing. online. *Additive Manufacturing*. 2021, roč. 47. ISSN 22148604. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102272>. [cit. 2023-04-10].
- [174] STRAUMIT, Ilya; VANDEPITTE, Dirk; WEVERS, Martine a LOMOV, Stepan. Identification of the flax fibre modulus based on an impregnated quasi-unidirectional fibre bundle test and X-ray computed tomography. online. *Composites Science and Technology*. 2017, roč. 151, s. 124-130. ISSN 02663538. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.07.029>. [cit. 2023-04-10].
- [175] BRUNI-BOSSIO, Brianna; MELENKA, Garrett; AYRANCI, Cagri a CAREY, Jason. Micro-computed tomography analysis of natural fiber and bio-matrix tubular-braided composites. online. *Journal of Composite Materials*. 2019, roč. 53, č. 28-30, s. 4003-4013. ISSN 0021-9983. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0021998319853023>. [cit. 2023-04-10].
- [176] KARAMOV, Radmir; MARTULLI, Luca; KERSCHBAUM, Martin; SERGEICHEV, Ivan; SWOLFS, Yentl et al. Micro-CT based structure tensor analysis of fibre orientation in random fibre composites versus high-fidelity fibre identification

- methods. online. *Composite Structures*. 2020, roč. 235. ISSN 02638223. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111818>. [cit. 2023-04-10].
- [177] RASHIDI, Armin; OLFATBAKHS, Tina; CRAWFORD, Bryn a MILANI, Abbas. A Review of Current Challenges and Case Study toward Optimizing Micro-Computed X-Ray Tomography of Carbon Fabric Composites. online. *Materials*. 2020, roč. 13, č. 16. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma13163606>. [cit. 2023-04-10].
- [178] GAO, Yantao; HU, Wenfeng; XIN, Sanfa a SUN, Lijuan. A review of applications of CT imaging on fiber reinforced composites. online. *Journal of Composite Materials*. 2022, roč. 56, č. 1, s. 133-164. ISSN 0021-9983. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/00219983211050705>. [cit. 2023-04-10].
- [179] GRIEBER, Andreas; WESTERTEIGER, Rolf; GLATT, Erik; HAGEN, Hans a WIEGMANN, Andreas. Identification and analysis of fibers in ultra-large micro-CT scans of nonwoven textiles using deep learning. online. *The Journal of The Textile Institute*. s. 1-11. ISSN 0040-5000. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/00405000.2022.2145429>. [cit. 2023-04-10].
- [180] TOWNSEND, Philip; LARSSON, Emanuel; KARLSON, Tomas; HALL, Stephen; LUNDMAN, Malin et al. Stochastic modelling of 3D fiber structures imaged with X-ray microtomography. online. *Computational Materials Science*. 2021, roč. 194. ISSN 09270256. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2021.110433>. [cit. 2023-04-10].
- [181] DEPRIESTER, Dorian; ROLLAND DU ROSCOAT, Sabine; ORGÉAS, Laurent; GEINDREAU, Christian; LEVRARD, Benjamin et al. Individual fibre separation in 3D fibrous materials imaged by X-ray tomography. online. *Journal of Microscopy*. 2022, roč. 286, č. 3, s. 220-239. ISSN 0022-2720. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/jmi.13096>. [cit. 2023-04-10].
- [182] JIANG, Ning; LI, Yaomin; LI, Di; YU, Tao; LI, Yan et al. 3D finite element modeling of water diffusion behavior of jute/PLA composite based on X-ray computed tomography. online. *Composites Science and Technology*. 2020, roč. 199. ISSN 02663538. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108313>. [cit. 2023-04-10].
- [183] GOLDFINE, Neil. Eddy Current Arrays for Structural Health Monitoring. online. In: *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier, 2022. ISBN 9780128035818. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822944-6.00037-2>. [cit. 2023-04-10].
- [184] MEGALI, Giuseppe; PELLICANO, Diego; CACCIOLA, Matteo; CALCAGNO, Salvatore; VERSACI, Mario et al. EC MODELLING AND ENHANCEMENT SIGNALS IN CFRP INSPECTION. online. *Progress In Electromagnetics Research M*. 2010, roč. 14, s. 45-60. ISSN 1937-8726. Dostupné z: <https://doi.org/10.2528/PIERM10072705>. [cit. 2023-04-10].
- [185] MUIR, C.; SWAMINATHAN, B.; ALMANSOUR, A.; SEVENER, K.; SMITH, C. et al. Damage mechanism identification in composites via machine learning and acoustic emission. online. *Npj Computational Materials*. 2021, roč. 7, č. 1. ISSN 2057-3960. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41524-021-00565-x>. [cit. 2023-04-10].
- [186] 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].

- [187] VINU KUMAR, S; SENTHIL KUMAR, K; SIDDHI JAILANI, H a RAJAMURUGAN, G. Mechanical, DMA and Sound Acoustic behaviour of Flax woven fabric reinforced Epoxy composites. online. *Materials Research Express*. 2020, roč. 7, č. 8. ISSN 2053-1591. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/abaea5>. [cit. 2024-01-06].
- [188] CIHAN, M.; SOBEY, A.J. a BLAKE, J.I.R. Mechanical and dynamic performance of woven flax/E-glass hybrid composites. online. *Composites Science and Technology*. 2019, roč. 172, s. 36-42. ISSN 02663538. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.12.030>. [cit. 2024-01-06].
- [189] 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].
- [190] BEN AMEUR, Mariem; EL MAHI, Abderrahim; REBIERE, Jean-Luc; ABDENNADHER, Moez a HADDAR, Mohamed. Damping Analysis of Unidirectional Carbon/Flax Fiber Hybrid Composites. online. *International Journal of Applied Mechanics*. 2018, roč. 10, č. 05. ISSN 1758-8251. Dostupné z: <https://doi.org/10.1142/S1758825118500503>. [cit. 2024-01-06].
- [191] RAHMAN, Md; JAYARAMAN, Krishnan a MACE, Brian. Vibration damping of flax fibre-reinforced polypropylene composites. online. *Fibers and Polymers*. 2017, roč. 18, č. 11, s. 2187-2195. ISSN 1229-9197. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12221-017-7418-y>. [cit. 2024-01-06].
- [192] DAOUD, Hajer; REBIÈRE, Jean-Luc; MAKNI, Amine; TAKTAK, Mohamed; EL MAHI, Abderrahim et al. Numerical and Experimental Characterization of the Dynamic Properties of Flax Fiber Reinforced Composites. online. *International Journal of Applied Mechanics*. 2016, roč. 08, č. 05. ISSN 1758-8251. Dostupné z: <https://doi.org/10.1142/S175882511650068X>. [cit. 2024-01-06].
- [193] FIORE, Vincenzo; SANFILIPPO, Carmelo a CALABRESE, Luigi. Dynamic Mechanical Behavior Analysis of Flax/Jute Fiber-Reinforced Composites under Salt-Fog Spray Environment. online. *Polymers*. 2020, roč. 12, č. 3. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym12030716>. [cit. 2024-01-06].
- [194] HU, Jianxing; YIN, Sha; YU, T.X. a XU, Jun. Dynamic compressive behavior of woven flax-epoxy-laminated composites. online. *International Journal of Impact Engineering*. 2018, roč. 117, s. 63-74. ISSN 0734743X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.03.004>. [cit. 2024-01-06].
- [195] DHAKAL, Hom a SAIN, Mohini. Enhancement of Mechanical Properties of Flax-Epoxy Composite with Carbon Fibre Hybridisation for Lightweight Applications. online. *Materials*. 2020, roč. 13, č. 1. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma13010109>. [cit. 2024-01-06].
- [196] SARASINI, Fabrizio; TIRILLÒ, Jacopo; D'ALTILIA, Simone; VALENTE, Teodoro; SANTULLI, Carlo et al. Damage tolerance of carbon/flax hybrid composites subjected to low velocity impact. online. *Composites Part B: Engineering*. 2016, roč. 91, s. 144-153. ISSN 13598368. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.01.050>. [cit. 2024-01-06].
- [197] ASSARAR, Mustapha; ZOUARI, Wajdi; SABHI, Hamid; AYAD, Rezak a BERTHELOT, Jean-Marie. Evaluation of the damping of hybrid carbon-flax reinforced composites. online. *Composite Structures*. 2015, roč. 132, s. 148-154. ISSN

02638223. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.05.016>. [cit. 2022-02-11].
- [198] AL-HAJAJ, Zainab; SY, Benedict; BOUGHERARA, Habiba a ZDERO, Radovan. Impact properties of a new hybrid composite material made from woven carbon fibres plus flax fibres in an epoxy matrix. online. *Composite Structures*. 2019, roč. 208, s. 346-356. ISSN 02638223. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.033>. [cit. 2024-01-06].
- [199] ASSARAR, Mustapha; ZOUARI, Wajdi; AYAD, Rezak; KEBIR, Hocine a BERTHELOT, Jean-Marie. Improving the damping properties of carbon fibre reinforced composites by interleaving flax and viscoelastic layers. online. *Composites Part B: Engineering*. 2018, roč. 152, s. 248-255. ISSN 13598368. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.07.010>. [cit. 2024-01-06].
- [200] LONGANA, Marco; ONDRA, Vaclav; YU, HaNa; POTTER, Kevin a HAMERTON, Ian. Reclaimed Carbon and Flax Fibre Composites: Manufacturing and Mechanical Properties. online. *Recycling*. 2018, roč. 3, č. 4. ISSN 2313-4321. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/recycling3040052>. [cit. 2024-01-06].
- [201] 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].
- [202] WANG, Anni; WANG, Xiaojun a XIAN, Guijun. Mechanical, low-velocity impact, and hydrothermal aging properties of flax/carbon hybrid composite plates. online. *Polymer Testing*. 2020, roč. 90. ISSN 01429418. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106759>. [cit. 2024-01-06].
- [203] WANG, Anni; WANG, Xiaojun a XIAN, Guijun. The influence of stacking sequence on the low-velocity impact response and damping behavior of carbon and flax fabric reinforced hybrid composites. online. *Polymer Testing*. 2021, roč. 104. ISSN 01429418. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107384>. [cit. 2024-01-06].
- [204] WANG, Anni; LIU, Xiaogang; YUE, Qingrui a XIAN, Guijun. Hydrothermal durability of unidirectional flax/carbon fiber hybrid composite plates. online. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023, roč. 22, s. 2043-2061. ISSN 22387854. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.12.021>. [cit. 2024-01-06].
- [205] MOUSTAFA, Essam a ALMITANI, Khalid. Detecting Damage in Carbon Fibre Composites using Numerical Analysis and Vibration Measurements. online. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2021, roč. 18, č. 3. ISSN 1679-7825. Dostupné z: <https://doi.org/10.1590/1679-78256294>. [cit. 2024-01-06].
- [206] ARAÚJO DOS SANTOS, J.V.; MOTA SOARES, C.M.; MOTA SOARES, C.A. a MAIA, N.M.M. Structural damage identification in laminated structures using FRF data. online. *Composite Structures*. 2005, roč. 67, č. 2, s. 239-249. ISSN 02638223. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.09.011>. [cit. 2024-01-06].
- [207] KULÍŠEK, Viktor; KOLAR, Petr; VRBA, Pavel; SMOLÍK, Jan; JANOTA, Miroslav et al. On passive damping in machine tool hybrid structural parts. online. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021, roč. 114, č. 7-8, s. 1925-1952. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06865-2>. [cit. 2022-02-12].

- [208] SADEGHIFAR, Morteza; SEDAGHATI, Ramin; JOMAA, Walid a SONGMENE, Victor. A comprehensive review of finite element modeling of orthogonal machining process: chip formation and surface integrity predictions. online. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018, roč. 96, č. 9-12, s. 3747-3791. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1759-6>. [cit. 2024-02-25].
- [209] MASEK, Petr; ZEMAN, Pavel; KOLAR, Petr a HOLESOVSKY, František. Edge trimming of C/PPS plates. online. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019, roč. 101, č. 1-4, s. 157-170. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2857-1>. [cit. 2024-02-25].
- [210] RAMULU, M. Machining and surface integrity of fibre-reinforced plastic composites. online. *Sadhana*. 1997, roč. 22, č. 3, s. 449-472. ISSN 0256-2499. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BF02744483>. [cit. 2024-02-25].
- [211] CHEGDANI, Faissal; EL MANSORI, Mohamed; T. S. BUKKAPATNAM, Satish a REDDY, J. N. Micromechanical modeling of the machining behavior of natural fiber-reinforced polymer composites. online. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019, roč. 105, č. 1-4, s. 1549-1561. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04271-3>. [cit. 2024-02-25].
- [212] SLAMANI, Mohamed a CHATELAIN, Jean-François. A review on the machining of polymer composites reinforced with carbon (CFRP), glass (GFRP), and natural fibers (NFRP). online. *Discover Mechanical Engineering*. 2023, roč. 2, č. 1. ISSN 2731-6564. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s44245-023-00011-w>. [cit. 2024-02-25].
- [213] ÇELIK, Yahya H; KILICKAP, Erol a KILICKAP, Ali İmran. An experimental study on milling of natural fiber (jute)- reinforced p. *Journal of Composite Materials*. 2019, roč. 53, č. 22, s. 3127-3137. ISSN 0021-9983. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0021998319826373>.
- [214] WANG, D.; ONAWUMI, P.Y.; ISMAIL, S.O.; DHAKAL, H.N.; POPOV, I. et al. Machinability of natural-fibre-reinforced polymer composites: Conventional vs ultrasonically-assisted machining. online. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2019, roč. 119, s. 188-195. ISSN 1359835X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.01.028>. [cit. 2024-02-25].
- [215] JOHN, Raveen; LIN, Richard; JAYARAMAN, Krishnan a BHATTACHARYYA, Debes. Effects of machining parameters on surface quality of composites reinf. *Materials and Manufacturing Processes*. 2020, roč. 36, č. 1, s. 73-83. ISSN 1042-6914. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1813896>.
- [216] NASSAR, Mahmoud M. A.; ARUNACHALAM, Ramanathan a ALZEBDEH, Khalid I. Machinability of natural fiber reinforced composites: a review. online. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017, roč. 88, č. 9-12, s. 2985-3004. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9010-9>. [cit. 2024-02-25].
- [217] RAJ, Sonia S Raj; DHAS, J Edwin Raja a JESUTHANAM, CP. Challenges on machining characteristics of natural fiber-reinforced co. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2020, roč. 40, č. 1-2, s. 41-69. ISSN 0731-6844. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0731684420940773>.
- [218] JANI, S.P.; SENTHIL KUMAR, A.; KHAN, M. Adam a SUJIN JOSE, A. Design and optimization of unit production cost for AWJ process on machining hybrid natural fibre composite material. online. *International Journal of Lightweight Materials and*

- Manufacture*. 2021, roč. 4, č. 4, s. 491-497. ISSN 25888404. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2021.07.002>. [cit. 2024-02-25].
- [219] SOATTHIYANON, Niphaphun; CROSKY, Alan a HEITZMANN, Michael. Comparison of Experimental and Calculated Tensile Properties of Flax Fibres. online. *Journal of Composites Science*. 2022, roč. 6, č. 4. ISSN 2504-477X. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/jcs6040100>. [cit. 2023-05-01].
- [220] *LG 700 Epoxy System: Data Sheet*. 4.0. Olomouc, 2004.
- [221] HINDERSMANN, Arne. Confusion about infusion: An overview of infusion processes. online. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2019, roč. 126. ISSN 1359835X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105583>. [cit. 2021-05-21].
- [222] SCHUSTER, J.; GOVIGNON, Q. a BICKERTON, S. Processability of Biobased Thermoset Resins and Flax Fibres Reinforcements Using Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding. online. *Open Journal of Composite Materials*. 2014, roč. 04, č. 01, s. 1-11. ISSN 2164-5612. Dostupné z: <https://doi.org/10.4236/ojcm.2014.41001>. [cit. 2023-05-01].
- [223] *MEEM Carbon-Prepreg datasheet ER 38*. Plzeň, 2020.
- [224] CHERIF, Zine; POILÂNE, Christophe; FALHER, Thierry; VIVET, Alexandre; OUAIL, Nabil et al. Influence of textile treatment on mechanical and sorption properties of flax/epoxy composites. online. *Polymer Composites*. 2013, roč. 34, č. 10, s. 1761-1773. ISSN 02728397. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/pc.22580>. [cit. 2024-01-14].
- [225] ELSAYED, Hamdy; FARAG, Mahmoud; MEGAHED, Hassan a MEHANNY, Sherif. Influence of Flax Fibers on Properties of Starch-Based Composites. online. In: *Volume 3: Design, Materials and Manufacturing, Parts A, B, and C*. American Society of Mechanical Engineers, 2012, s. 1397-1408. ISBN 978-0-7918-4519-6. Dostupné z: <https://doi.org/10.1115/IMECE2012-89628>. [cit. 2024-01-14].
- [226] DE KERGARIOU, C; LE DUIGOU, A; POPINEAU, V; GAGER, V; KERVOELEN, A et al. Measure of porosity in flax fibres reinforced polylactic acid biocomposites. *COMPOSITES PART A-APPLIED SCIENCE AND MANUFACTURING*. FEB, roč. 141. ISSN 1359-835X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106183>.
- [227] Fibre-Reinforced Plastic Composites. Determination of Flexural Properties. online. *International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland*. 1999. [cit. 2024-02-16].
- [228] 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].
- [229] VOLEK, A. a ZOUHAR, J. Optical methods in use by experimental strain measurement. online. In: *Proceedings of the 48th International scientific conference on Experimental stress analysis 2010*. 2010, s. 527-533. [cit. 2024-02-16].
- [230] ZHANG, Yongli; LI, Yan; MA, Hao a YU, Tao. Tensile and interfacial properties of unidirectional flax/glass fiber reinforced hybrid composites. online. *Composites science and technology*. 2013, roč. 88, s. 172-177. ISSN 0266-3538. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.08.037>. [cit. 2024-02-16].

- [231] PHILLIPS, Steven; BAETS, Joris; LESSARD, Larry; HUBERT, Pascal a VERPOEST, Ignaas. Characterization of flax/epoxy prepregs before and after cure. online. *Journal of reinforced plastics and composites*. 2013, roč. 32, č. 11, s. 777-785. ISSN 0731-6844. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0731684412473359>. [cit. 2024-02-17].
- [232] FAIRLIE, George a NJUGUNA, James. Damping properties of flax/carbon hybrid epoxy/fibre-reinforced composites for automotive semi-structural applications. online. *Fibers*. 2020, roč. 8, č. 10, s. 1-15. ISSN 2079-6439. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/fib8100064>. [cit. 2024-02-17].
- [233] 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. online. *Composites. Part A, Applied science and manufacturing*. 2018, roč. 115, s. 46-56. ISSN 1359-835X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.09.015>. [cit. 2024-02-17].
- [234] ATMAKURI, Ayyappa; PALEVICIUS, Arvydas; SIDDABATHULA, Madhusudan; VILKAUSKAS, Andrius a JANUSAS, Giedrius. Analysis of mechanical and wettability properties of natural fiber-reinforced epoxy hybrid composites. online. *Polymers*. 2020, roč. 12, č. 12, s. 1-15. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym12122827>. [cit. 2024-02-17].
- [235] BOLCU, Dumitru a STĂNESCU, Marius Marinel. A study of the mechanical properties of composite materials with a dammar-based hybrid matrix and two types of flax fabric reinforcement. online. *Polymers*. 2020, roč. 12, č. 8, s. 1649. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/POLYM12081649>. [cit. 2024-02-17].
- [236] MAHBOOB, Zia; EL SAWI, Ihab; ZDERO, Radovan; FAWAZ, Zouheir a BOUGHERARA, Habiba. Tensile and compressive damaged response in Flax fibre reinforced epoxy composites. online. *Composites. Part A, Applied science and manufacturing*. 2017, roč. 92, s. 118-133. ISSN 1359-835X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.11.007>. [cit. 2024-02-17].
- [237] CHEN, Dongdong; SUN, Guangyong; MENG, Maozhou; JIN, Xihong a LI, Qing. Flexural performance and cost efficiency of carbon/basalt/glass hybrid FRP composite laminates. online. *Thin-walled structures*. 2019, roč. 142, s. 516-531. ISSN 0263-8231. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.03.056>. [cit. 2024-02-17].
- [238] 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. 2024-02-17].
- [239] LU, Maria Morissa; FUENTES, Carlos A. a VAN VUURE, Aart Willem. Moisture sorption and swelling of flax fibre and flax fibre composites. online. *Composites. Part B, Engineering*. 2022, roč. 231, s. 109538. ISSN 1359-8368. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109538>. [cit. 2024-02-17].
- [240] BENKHELLADI, Asma; LAOUICI, Hamdi a BOUCHOUCHA, Ali. Tensile and flexural properties of polymer composites reinforced by flax, jute and sisal fibres. online. *International journal of advanced manufacturing technology*. 2020, roč. 108, č. 3, s. 895-916. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05427-2>. [cit. 2024-02-17].
- [241] DINESH, M.; ASOKAN, R.; VIGNESH, S.; KUMAR, Chitikena Phani a RAVICHAND, Rajulapati. Experimental investigation on mechanical properties of

- carbon-flax-glass hybrid composites. online. *International journal of vehicle structures and systems*. 2020, roč. 12, č. 1, s. 1-8. ISSN 0975-3060. Dostupné z: <https://doi.org/10.4273/ijvss.12.1.01>. [cit. 2024-02-17].
- [242] JONES, Robert M. *Mechanics Of Composite Materials*. online. 2nd Edition. CRC Press, 2018. ISBN 9781315272986. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781498711067>. [cit. 2024-02-17].
- [243] CAMPBELL, F.C. *Structural Composite Materials*. Ohio, USA,: ASM International, 2010. ISBN 978-1-61503-037-8.
- [244] SCHUSTER, J.; GOVIGNON, Q. a BICKERTON, S. Processability of Biobased Thermoset Resins and Flax Fibres Reinforcements Using Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding. online. *Open Journal of Composite Materials*. 2014, roč. 04, č. 01, s. 1-11. ISSN 2164-5612. Dostupné z: <https://doi.org/10.4236/ojcm.2014.41001>. [cit. 2024-02-17].
- [245] MOUDOOD, Abdul; RAHMAN, Anisur; ÖCHSNER, Andreas; ISLAM, Mainul a FRANCUCCI, Gaston. Flax fiber and its composites: An overview of water and moisture absorption impact on their performance. online. *Journal of reinforced plastics and composites*. 2019, roč. 38, č. 7, s. 323-339. ISSN 0731-6844. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0731684418818893>. [cit. 2024-02-17].
- [246] CÉSAR DOS SANTOS, Júlio; ÁVILA DE OLIVEIRA, Livia; PANZERA, Túlio Hallak; REMILLAT, Chrystel D.L.; FARROW, Ian et al. Ageing of autoclaved epoxy/flax composites: Effects on water absorption, porosity and flexural behaviour. online. *Composites. Part B, Engineering*. 2020, roč. 202, s. 108380. ISSN 1359-8368. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108380>. [cit. 2024-02-17].
- [247] PATUREL, Angeline a DHAKAL, Hom Nath. Influence of water absorption on the low velocity falling weight impact damage behaviour of flax/glass reinforced vinyl ester hybrid composites. online. *Molecules (Basel, Switzerland)*. 2020, roč. 25, č. 2, s. 278. ISSN 1420-3049. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/molecules25020278>. [cit. 2024-02-17].
- [248] ONDIEK, Wycliffe; KONDO, Masahiro; ADACHI, Maki; MACADRE, Arnaud a GODA, Koichi. Effect of Surface Coating and Plasma Treatment on Mechanical Properties of Wood Plastic Composites. online. *Journal of Composites Science*. 2023, roč. 7, č. 7. ISSN 2504-477X. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/jcs7070296>. [cit. 2024-02-14].
- [249] XIROS, Nikolaos; TZELEPIS, Vasileios a LOGHIS, Eleftherios. Modeling and Simulation of Planing-Hull Watercraft Outfitted with an Electric Motor Drive and a Surface-Piercing Propeller. online. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2019, roč. 7, č. 2. ISSN 2077-1312. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/jmse7020049>. [cit. 2024-01-06].
- [250] LIN, Tian; PAN, Jie; O'SHEA, Peter a MECHEFSKE, Chris. A study of vibration and vibration control of ship structures. online. *Marine Structures*. 2009, roč. 22, č. 4, s. 730-743. ISSN 09518339. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2009.06.004>. [cit. 2024-01-06].
- [251] BHANU PRASANNA, A.S.; SANYASI RAJU, K.K.K.; RAMJI, K. a SATISH, P. Free Vibration, Buckling and Design Optimisation of Composite Pressure Hulls. *Materials Today: Proceedings*. 2017, roč. 4, č. 8, s. 7381-7387. ISSN 2214-7853. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.068>.
- [252] 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>.
- [253] SINGH C, Quberk a RAJAMURUGAN, G. Vibration and tribological behaviour of flax/wire mesh/hemp composite reinforced with WCFC particles. online. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022, roč. 77, s. 525-538. ISSN 15266125. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.03.036>. [cit. 2024-01-06].
- [254] CÉSAR DOS SANTOS, Júlio; ÁVILA DE OLIVEIRA, Lívia; PANZERA, Túlio; REMILLAT, Chrystel; FARROW, Ian et al. Ageing of autoclaved epoxy/flax composites: Effects on water absorption, porosity and flexural behaviour. online. *Composites Part B: Engineering*. 2020, roč. 202. ISSN 13598368. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108380>. [cit. 2022-02-12].
- [255] FIORE, V.; CALABRESE, L.; MIRANDA, R.; BADAGLIACCO, D.; SANFILIPPO, C. et al. On the response of flax fiber reinforced composites under salt-fog/dry conditions: Reversible and irreversible performances degradation. online. *Composites Part B: Engineering*. 2022, roč. 230. ISSN 13598368. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109535>. [cit. 2022-02-11].
- [256] FAIRLIE, George a NJUGUNA, James. Damping Properties of Flax/Carbon Hybrid Epoxy/Fibre-Reinforced Composites for Automotive Semi-Structural Applications. *Fibers*. 2020, roč. 8, č. 10. ISSN 2079-6439. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/fib8100064>.
- [257] CHINNASAMY, Senthamaraikannan. Study on static and dynamic behavior of jute/sisal fiber reinforced epoxy composites. *Materials today: proceedings*. 2020, roč. 46. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.064>.
- [258] HASSANI, Sahar a SHADAN, Fariba. Using incomplete FRF measurements for damage detection of structures with closely-spaced eigenvalues. online. *Measurement*. 2022, roč. 188. ISSN 02632241. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110388>. [cit. 2024-01-06].
- [259] YUAN, Wei-bin; LI, Long-Yuan a JANG, Sung-Hwan. Dynamic stability of CNTs-reinforced non-uniform composite beams under axial excitation loading. online. *Computational Materials Science*. 2022, roč. 210. ISSN 09270256. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2021.111054>. [cit. 2024-01-06].
- [260] PETER HOSE, Portia a ANUPAMA KRISHNA, D. Free vibration analysis of polymer composite plates reinforced with graphene platelets. online. *Materials Today: Proceedings*. 2022, roč. 65, s. 961-968. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.531>. [cit. 2024-01-06].
- [261] MA, Mingze; YAO, Weixing; JIANG, Wen; JIN, Wei; CHEN, Yan et al. Fatigue of composite honeycomb sandwich panels under random vibration load. online. *Composite Structures*. 2022, roč. 286. ISSN 02638223. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115296>. [cit. 2024-01-06].
- [262] VASCONCELLOS, J.M. a LATORRE, R.G. Recreational boat noise level evaluation. *Ocean Engineering*. 2001, roč. 28, č. 9, s. 1309-1324. ISSN 0029-8018. Dostupné z: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(00\)00052-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0029-8018(00)00052-4).
- [263] LI, Zhongzhe; KANG, Jian a BA, Meihui. Influence of distance from traffic sounds on physiological indicators and subjective evaluation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2020, roč. 87, s. 102538. ISSN 1361-9209. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102538>.

[264] KOVALCIK, Jaroslav; ZEMAN, Pavel; HOLESOVSKY, Frantisek; MADL, Jan a KUCEROVA, Ludmila. CUTTING FORCE MODELLING WITH EFFECTS OF CUTTING TOOL GEOMETRY AND TOOL WEAR IN MILLING OF DIN C45 STEEL. online. *MM Science Journal*. 2020, roč. 2020, č. 1, s. 3784-3793. ISSN 18031269. Dostupné z: https://doi.org/10.17973/MMSJ.2020_03_2019124. [cit. 2024-02-26].

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
A	Plocha průřezu	[mm ²]
A _o	Velikost plochy dle reálného měřeného průřezu vzorku	[mm ²]
E	Modul pružnosti	[MPa]
E _c	Modul pružnosti	[MPa]
E _f	Youngův modul pružnosti vlákna	[MPa]
E _{ijkl}	Tenzor tuhosti 4tého řádu	[MPa]
E _m	Youngův modul pružnosti matrice	[MPa]
E ₁	Základní materiálová charakteristika	[MPa]
E ₂	Základní materiálová charakteristika	[MPa]
F _a	Aktivní síla	[N]
F _c	Řezná síla	[N]
F _f	Síla ve směru osy x	[N]
F _m	Maximální síla	[N]
F _p	Pasivní síla	[N]
F _x	Síla ve směru osy x	[N]
F _z	Pasivní síla	[N]
G ₁₂	Základní materiálová charakteristika	[-]
K	Permeabilita výztuže	[m ²]
L	Délka dráhy	[m]
M _c	Hmotnostní podíl kompozitu	[-]
M _f	Hmotnostní podíl vláken	[-]
M _m	Hmotnostní podíl matrice	[-]
Q	Objemový průtok	[l/min]
Q	Matice tuhosti	[-]
R _a	Průměrná aritmetická úchylka povrchu	[μm]
R _m	Mez pevnosti	[MPa]
R _z	Střední hloubka drsnosti	[μm]
S	Matice poddajnosti	[-]
S _c	Matice poddajnosti kompozitu	[-]
S _f	Matice poddajnosti vlákna	[-]
S _m	Matice poddajnosti matrice	[-]
T _g	Teplotu skelného přechodu matrice	[°C]
V _c	Objemový podíl kompozitu	[-]
V _d	Objemový podíl dutin	[-]
V _f	Objemový podíl vláken	[-]
V _m	Objemový podíl matrice	[-]
V _p	Objemový podíl porosity	[-]
m _c	Hmotnost kompozitu	[g]
m _f	Hmotnost vláken	[g]
m _k	Hmotnost vzorku po testu nasákavosti	[g]
m _m	Hmotnost matrice	[g]
m _p	Hmotnost vzorku	[g]
n _{vrst}	Počet vrstev	[-]
n	Exponent účinku porosity	[-]
n	Otáčky vřetene	[min ⁻¹]

Označení	Legenda	Jednotka
p	Tlak	[Pa]
p _v	Aplikovaný tlak	[Pa]
p ₀	Počáteční tlak	[Pa]
t	Čas	[s]
t*	Minimální požadovaný čas odvakuování	[s]
v _c	Řezná rychlost	[m/min]
v _f	Objemový podíl vláken	[-]
v _f	Posuvová rychlost	[mm/min]
v _{fkrit}	Kritická hodnota objemového podílu vláken	[-]
v _{fmin}	Minimální hodnota podílu vláken	[-]
v _m	Objemový podíl matrice	[-]
w	směr	[-]
x	Vzdálenost	[m]
z	Počet břitů	[-]
Δp	Tlakový gradient	[Pa]
Δm _{200h}	Změna hmotnosti po 200k	[g]
α	koeficient	[μm·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
α _o	Úhel hřbetu	[°]
γ _o	Úhel čela	[°]
ε _{Tk}	Kritické prodloužení v lomu	[-]
ε _f	Mezní prodloužení vlákna	[-]
ε _m	Mezní prodloužení matrice	[-]
η	Viskozita matrice	[-]
η ₀	Konstanta orientace vláken	[-]
η ₁	Konstanta délky vláken	[-]
μ	Dynamická viskozita plynu	[Pa·s]
μ ₁₂	Základní materiálová charakteristika	[-]
ρ	Hustota	[kg·m ⁻³]
ρ _c	Hustota kompozitu	[kg·m ⁻³]
ρ _f	Hustota vláken	[kg·m ⁻³]
ρ _m	Hustota matrice	[kg·m ⁻³]
σ	Napětí	[MPa]
σ _c	Napětí kompozitu průměrné podélné	[MPa]
σ _f	Napětí ve vláknu	[MPa]
σ _m	Maximální napětí	[MPa]
(σ _m) _{efkrit}	Napětí v matrici odpovídající kritické deformaci vláken	[MPa]
∅	Porozita	[-]
∅ _F	Požadovaný stupeň pórovitosti	[-]

Zkratky

Označení	Legenda
AE	Akustická emise
AEP	Aminoethylpiperazin
AFP	Metoda pro automatické kladení vláken
APA	Aromatické polyamidy
ATL	Metoda pro automatické kladení vláken

Označení	Legenda
BF3-MEA	Trifluorid bóru s monoethylaminem
BGDGE	Butylenglykoldiglycidylether
BMC	Bulk moulding compound
BMI	Bismaleimidy
BTD	Benzofenontetra-karboxylový dianhydrid
CA	Anhydrid kyselinyhexachlorkarboxylové
CE	Kyanoestery
CFP	Continous Filamanet Placement
CFRP	Carbon fibre reinforced plastic
DDS	Diaminodifenysulfon
DDSA	Anhydrid kyseliny dodecyljantarové
DEAPA	Diethylaminopropylamin
DGEBPA	Diglycidylether BPA
DIC Y	Dikyandiamid
DOE	Plánovaný experiment
DTA	Diethylentriamin
EP-R	Epoxidové pryskyřice
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
FFT	Fast Fourier Analysis
FRF	Frequenci responce function
FRP	Druh kompozitu
HPHA	Hexahydroftalový anhydrid
HM	High modulus vysokomodulová grafitizovaná vlákna.
HMPP	Vysokomodulová vlákna polypropylenu
HMTA	Hexamethylentetramin
HP-RTM	High Pressure Resin Transfer Moulding
HS	High strenght
HT	High tensile
IFBT	Zkouška svazku impregnovaných vláken
IM	Intermediete modulus – vlákna velmi pevná se středním modulem pružnosti
IM	Injection moulding
KPV	Kompozity s přírodními vlákny
LCP	Polymery s kapalnými krystaly
LRTM	Infuze
MDA	Methylendianilin
MPDA	Methafenyldiamin
NDT	Non-destructive testing
OOA	Out Of Autoclave
PA	Polyamid
PA 46	Polyamid 46
PAI	Polyamidoimid
PAN	Uhlíková vlákna
PBO	Polybenzo-bisoxazol
PC	Polycarbonate
PE	Teplota tání
PEEK	Polyaryletherketony
PEI	Polyetherimid
PEK	Polyaryletherketony
PEKEKK	Polyaryletherketony

Označení	Legenda
PES	Polyeaster
PET	Polyethylentereftalátová vlákna
PEI	Polytherimidová vlákna
PESU	Polyethersulfon
PF	Fenolické pryskyřice
PI	Polymidová vlákna
PI	Reaktoplastické polyimidy
PIPD	Vlákno M5
PLA	Polyacid
PN	Ftalonitrilové pryskyřice
PPA	Polyftalamidy
PPS	Polyfenylsulfid
PPSU	polyfenylsulfon
PSU	Polysulfon
PUR	Tvrdé polyurethanové pryskyřice
RFI	Resin Film Infusion
RTM	Resin Transfer Moulding
SCRIMP	Seemann Composite Resin Infusion Moulding Process
SEM	Skenovací elektronová mikroskopie
SNOP	Diagram stability pro danou soustavu
TETA	Triethylentetraamin
TGAF	Triglycidylaminofenol
TGETPM	Triglycidylethertrifenylmethan
TGMDA	Tetraglycidyl methyldianilin
TMA	Trimelitanhydrid
TPI	Polyamidy
TPS	Thermal Protection System
TTT	Time-Temperature-Transformation
UF	Formaldehydové pryskyřice
UF	Formaldehydové pryskyřice
UHM	Ultra high modulus
UHMWPE	Ultra-high-molecular-weight polyethylene
UP-R	Nenasycené polyesterové pryskyřice
VARMT	Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding (Infuze)
VE-R	Vinylesterové
VE	Vinylesterové pryskyřice
VHM/UHM	Very/Ultra High modulus – vlákna s velkým modulem pružnosti
VI	Vizuální kontrola
VIP	Vacuum injection process
VT	Vizuální testování
WOS	Web of science
XCT	X-ray computed tomography