

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Bakalářská práce

2024

Ruslan Filippov

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Výroba a testování vzorků leteckých kompozitních materiálů v podmínkách
DFJP UPCE

Bakalářská práce

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Ruslan Filippov**
Osobní číslo: **D21371**
Studijní program: **B0716P040001 Technika, technologie a řízení letecké dopravy**
Téma práce: **Výroba a testování vzorků leteckých kompozitních materiálů v podmínkách DFJP UPCE**
Zadávající katedra: **Katedra letecké dopravy**

Zásady pro vypracování

Tato bakalářská práce je zacílena na vytvoření způsobů výroby vzorků kompozitních materiálů a jejich následné odzkoušení v podmínkách Univerzity Pardubice, Dopravní fakulty Jana Pernera. Teoretická část popisuje kompozitní materiály, způsoby jejich výroby, druhy matric a pojiv, stanovení rozměrů vzorků a parametrů pro provedení mechanické zkoušky a vyhodnocení výsledků měření vyrobených vzorků. Praktická část se zaměří na výrobu vzorků, provedení pevnostních zkoušek a vyhodnocení výsledků.

Rozsah pracovní zprávy: **minimálně 35 stran**
Rozsah grafických prací: **dle pokynů vedoucího práce**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

THOMASON, J.L. The influence of fibre length, diameter and concentration on the strength and strain to failure of glass fibre-reinforced polyamide 6,6. Online. ScienceDirect. 2008, roč. 2008, č. 10, s. 6. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.07.002>.
BAKER, Alan A.; DUTTON, Stuart A.; KELLY, Donald. Composite materials for aircraft structures. 2nd ed. Reston: AIAA American Institute of Aeronautics, 2004. ISBN 1-56347-540-5.
MENČÍK, Jaroslav. Aplikovaná mechanika materiálu. Univerzita Pardubice: Polygrafické středisko Univerzity Pardubice, červen 2019. ISBN 978-80-7560-227-5.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Pavel Švanda, Ph.D.**
Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů

Datum zadání bakalářské práce: **13. října 2023**
Termín odevzdání bakalářské práce: **13. května 2024**

L.S.

doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

Ing. Petr Mrázek, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 1. února 2024

Prohlašuji:

Práci s názvem: Výroba a testování vzorků leteckých kompozitních materiálů v podmínkách DFJP UPCE jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích den

Ruslan Filippov

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat představitelům dopravní společnosti Adelweis s.r.o. za pomoc při přípravě vzorků kompozitu v podobě poskytnutí dílny a veškerého potřebného vybavení a za pomoc finančního charakteru při pořizování materiálu.

Zároveň bych chtěl poděkovat paní prof. Ing. Evě Schmidové Ph.D. za pomoc při testování mechanických vlastností vzorků a panu doc. Ing. Pavlu Švandovi Ph.D. za ujetí se vedení dané práce.

ANOTACE

Tato bakalářská práce je zacílená na vytvoření způsobů výroby vzorků kompozitních materiálu a jejich následně odzkoušení v podmínkách Univerzity Pardubice, Dopravní fakulty Jana Pernera. Teoretická část popisuje kompozitní materiály, způsoby jejich výroby, druhy matric a pojiv, stanovení rozměru vzorku a parametrů pro provedení mechanické zkoušky a vyhodnocení výsledků měření vyrobených vzorků. Praktická část se zaměří na výrobu vzorků, provedení pevnostních zkoušek a vyhodnocení výsledků.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kompozit, kompozitní materiál, matrice, pojivo, testování vzorku, způsoby testování kompozitu v podmínkách DFJP

TITLE

Production and testing of samples of aviation composite materials in DFJP UPCE conditions

ANNOTATION

This bachelor's thesis is focused on creating methods of making samples of composite materials and then making test methods at the University of Pardubice, Faculty of Transport Engineering. The theoretical part describes composite materials, methods of production, species of fabrics and matrix, determination of the sample's properties and then performing a mechanical test and result evaluation. The practical part focuses on producing specimens, conducting strength tests, and evaluating the results.

KEYWORDS

Composite, composite materials, fabric, matrix, tensile test, test methods of composite materials at the DFJP

OBSAH

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK.....
TERMINOLOGIE
1 ÚVOD	11
2 SLOŽKY KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU.....	12
2.1. MATRICE.....	12
2.2. POJIVO.....	12
2.3. SKELNÁ TKANINA	13
2.4. UHLÍKOVÁ TKANINA.....	14
2.5. ARAMIDOVÁ TKANINA.....	15
2.6. KOMBINOVANÉ TKANINY	16
3 ZPŮSOBY VÝROBY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLU.....	17
3.1. VÝROBA LAMINÁTU ZA POMOCI VNITŘNÍCH FOREM	17
3.2. VÝROBA LAMINÁTU ZA POMOCI VNĚJŠÍCH FOREM	19
3.3. TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITU	19
3.3.1. VÝROBA LAMINÁTU ZA UŽITÍ VAKUOVÉHO ZAŘÍZENÍ.....	20
3.3.2. VÝROBA LAMINÁTU POMOCI LISOVACÍHO ZAŘÍZENÍ.....	21
4 TYPY STRUKTUR KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ UŽÍVANÝCH V LETECKÉM PRŮMYSLU	22
5 NÁVRH VZORKŮ PRO ZKOUŠENÍ MATERIÁLU V PODMÍNKÁCH UNIVERZITY PARDUBICE	23
5.1. ZKOUŠENÍ SKELNÉHO PRAMENCE PŘES KLADKU	24
5.2.1. VZOREK TKANINY PROSYCENÉ EPOXIDOVOU PRYSKYŘICÍ L285 + H285.....	26
5.2.2. ZÁVĚR ZKOUŠKY KOMBINACE AEROGLASS 110 + L285 + H285.....	27
5.3.1. VZOREK TKANINY PROSYCENÉ EPOXIDOVOU PRYSKYŘICÍ L285 + H500 – PROCES VÝROBY A TAHOVÁ ZKOUŠKA VZORKŮ.....	28
5.3.2. SROVNÁNÍ VÝSLEDKU TAHOVÉ ZKOUŠKY OBOU VZORKŮ.....	30
5.4. TESTOVÁNÍ VZORKŮ UHLÍKOVÉHO KOMPOZITU	30
6. STANOVENÍ ZPŮSOBU MĚŘENÍ PRAMENCŮ V PODMÍNKÁCH DFJP UPCE .	32

6.1. MĚŘENÍ SKELNÝCH PRAMENCŮ	33
6.2. MĚŘENÍ UHLÍKOVÝCH PRAMENCŮ	34
6.3. OPTIMÁLNÍ PARAMETRY PRO ZKOUŠENÍ VZORKŮ PRAMENCŮ MATRIC KOMPOZITNÍCH MATERIÁLU.....	35
7 TESTOVÁNÍ VZORKŮ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLU VYROBENÝCH MIMO DFJP UPCE.....	37
8 ZÁVĚR.....	38
9 SOUPIS BIBLIOGRAFICKÝCH CITACÍ	39
9.1. NORMY	40

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

OBRÁZEK 1 SKELNÁ TKANINA	14
OBRÁZEK 2 UHLÍKOVÁ TKANINA	15
OBRÁZEK 3 ARAMIDOVÁ TKANINA	16
OBRÁZEK 4 ARAMID-UHLÍKOVÁ TKANINA	16
OBRÁZEK 5 PŘÍPRAVA FORMY PRO VNITŘNÍ LAMINOVÁNÍ	18
OBRÁZEK 6 VLOŽENÍ SEPARAČNÍ FÓLIE DO FORMY	18
OBRÁZEK 7 PROSYCENÁ TKANINA (POHLED 1)	18
OBRÁZEK 8 PROSYCENÁ TKANINA (POHLED 1)	18
OBRÁZEK 9 VAKUOVÉ ZAŘÍZENÍ	21
OBRÁZEK 10 VAKUOVÉ ZAŘÍZENÍ	21
OBRÁZEK 11 LISOVACÍ STROJ – 1	22
OBRÁZEK 12 LISOVACÍ STROJ - 2.....	22
OBRÁZEK 13 LISOVACÍ STROJ – 3	22
OBRÁZEK 14 ŘEZ NOSNÉHO	23
OBRÁZEK 15 ŘEZ NOSNÉHO	23
OBRÁZEK 16 ŘEZ SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE	23
OBRÁZEK 17 UKÁZKA GRAFU, TAHOVÉ ZKOUŠKY, PŘES KLADKU	25
OBRÁZEK 18 KLADKA, POHLED - 1	25
OBRÁZEK 19 KLADKA, POHLED - 1	25
OBRÁZEK 20 VZOREK TKANINY	26
OBRÁZEK 21 VZOREK TKANINY	26
OBRÁZEK 22 GRAF TAHOVÉ ZKOUŠKY	26
OBRÁZEK 23 PROCES VÝROBY VZORKŮ L285 + H285 A L285 + H500	27
OBRÁZEK 24 OPRAVA KOMPONENTU DAF XF 105	28
OBRÁZEK 25 VZOREK LH500-1	29
OBRÁZEK 26 VZOREK LH500-1	29
OBRÁZEK 27 GRAF TAHOVÉ ZKOUŠKY	29
OBRÁZEK 28 VÝROBA VZORKŮ	31
OBRÁZEK 29 VÝROBA VZORKŮ	31
OBRÁZEK 30 VZOREK	31
OBRÁZEK 31 PORUŠENÍ	31
OBRÁZEK 32 GRAF STATICKÉ ZKOUŠKY	31

OBRÁZEK 33 VÝCHOZÍ STAV VLÁKNA	33
OBRÁZEK 34 UKÁZKA SKELNÉHO VLÁKNA PO PORUŠE.....	33
OBRÁZEK 35 VZOREK	38
OBRÁZEK 36 VZOREK	38
TABULKA 1 PORUŠENÍ SKELNÉHO VLÁKNA	25
TABULKA 2 PORUŠENÍ VZORKŮ L285 + H285.....	27
TABULKA 3 PORUŠENÍ VZORKŮ L285 + H500.....	29
TABULKA 4 PARAMETRY VZORKŮ UHLÍKOVÉHO KOMPOZITU	32
TABULKA 5 ZATÍŽENÍ VZORKŮ UHLÍKOVÉHO KOMPOZITU	32
TABULKA 6 POROVNÁNÍ HMOTNOSTI PRAMENCŮ SE ZATÍŽENÍM POTŘEBNÉM K PORUŠENÍ VLÁKEN	34
TABULKA 7 POROVNÁNÍ HMOTNOSTI JEDNOTLIVÝCH VLÁKEN VŮČI ZATÍŽENÍ POTŘEBNÉM K JEJICH PORUŠENÍ.....	35
TABULKA 8 PARAMETRY STANOVENÉ PRO TESTOVÁNÍ VLÁKEN KOMPOZITNÍCH MATERIÁLU	36
TABULKA 9 POROVNÁNÍ ZATÍŽENÍ.....	38
ROVNICE 1 VÝPOČET RYCHLOSTI POSUVU PŘÍČNÍKU	24

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

L285 – epoxidová pryskyřice vhodná pro aplikaci a vytvrzení za pokojových teplot

H285 – složka určená k vytvrzování epoxidu, doba zpracovatelnosti 50 min, vhodná pro následné temperování (50-55 °C)

H500 – složka určená k vytvrzování epoxidu, doba zpracovatelnosti 15 min

TERMINOLOGIE

Matrice – výztuž kompozitního materiálu

Pojivo – složka sloužící k propojení a zpevnění matic mezi sebou

Laminát – spojení více matic vrstvených na sebe

Syntetická pryskyřice – umělé vytvořený materiál, jedná ze složek pojiva

Tvrdidlo – složka pojiva, reaguje s pryskyřicí a zahajuje proces vytvrzení

Gelcoat – způsob povrchové ochrany laminátu

Temperování – proces tepelné úpravy materiálu, za využití speciálních pecí, za účelem zlepšení mechanických vlastností výsledného materiálu

Separační fólie – speciální fólie, využívána pro zabránění přilepení se epoxidu k povrchu formy

Tkanina – textilie, složená z propletených jednotlivých vláken, jednoho nebo více druhů, mezi sebou

Vlákno – jednotlivé prvky pramence

Pramenec – spletení více vláken do jednoho celku

Gramáž – číslo poskytující údaj o hmotnosti tkaniny na jeden m²

Tex – hmotnost jednoho kilometru vlákna

Příložky – část testovaného vzorku, sloužící k udržení testovaného vzorku v čelistech stroje. Zpravidla větší tloušťky než samotný vzorek.

Vakuování – technologický proces výroby, využívající podtlaku, pro odstranění bublinek vzduchu z materiálu a tím umožnění jeho dokonalému přilnutí

Lisování – technologický proces výroby, využívající tlaku, při výrobě či zpracování kompozitů

Vakuometr – zařízení v souladu s ČSN EN 837 – 1, sloužící k měření změny tlaku pomocí Bourdonové trubice

Prepreg – polotovar, předem prosycená tkanina zabalená do vzduchoprázdného obalu

Znovu laminace – způsob opracování původního laminovaného povrchu za účelem propojení s novým povrchem. Dochází k prosycení původního a nového povrchů a tím ke zlepšení přilnavosti ploch v místě styku.

1 ÚVOD

Kompozitní materiál je spojení dvou materiálů, jenž mají od sebe odlišné vlastnosti. Materiál, který se označuje jako kompozit v průmyslu, je uměle utvořený a aplikuje se ve více odvětvích. Kompozit využívaný v leteckém průmyslu (výroba vrtulí, křídel, trupu, ...) se skládá z matrice a pojiva. Pokud se kompozit skládá z více vrstev výztuže, pak se označuje jako laminát. Laminát se dá využít nejen v letectví, ale i v automobilovém průmyslu. První automobil, který byl celý vyroben z kompozitu byl „Corvette 1953“. [1]

Svůj největší rozvoj, ale tyto materiály nabraly začátkem 21. století. Kdy společnost Boeing začala aktivně aplikovat daný materiál do svých letadel. Aplikace kompozitních materiálů v dopravních prostředcích má pozitivní vliv na hmotnost a tím pádem i na celkovou spotřebu paliva, ale zároveň se nezhoršují pevnostní charakteristiky. [2]

Cílem této bakalářské práce je stanovení způsobu testování kompozitního materiálu v podmínkách výukového a výzkumného centra v dopravě. Zároveň se práce zaměřuje na všeobecný popis kompozitního materiálu, základní prvky, ze kterých se skládá postupy při výrobě kompozitních materiálů.

¹ MAR-BAL INC. *History of Composite Materials* [online]. North America, 2023 [cit. 2023-04-12]. <https://www.mar-bal.com/language/en/applications/history-of-composites/>. Dostupné z: <https://www.mar-bal.com/language/en/applications/history-of-composites/>

² ŠTEKNER, Bedřich; CABRNOCH, Bohuslav; JIRONČ, Josef a POMPE, Vilém. Nové poznatky a výsledky v oblasti materiálu, technologií, zkoušek a aplikací kompozitu v leteckém průmyslu ČR. Online. Transfer. 2012, roč. 12.4.2012, č. 17, s. 45. Dostupné z: <https://www.vzlu.cz/wp-content/uploads/2021/03/file694.pdf>. [cit. 2024-02-06].

2 SLOŽKY KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU

Kompozitní materiál se skládá ze dvou či více komponentů. Kompozitů se v průmyslu vyskytuje více druhů. Práce se zaměřuje na kompozitní materiály s vláknovou výztuží.

Kompozit je umělé propojení dvou materiálů, matrice a pojiva, jenž mají od sebe odlišné vlastnosti. Finální výrobek, který vznikne spojením komponentů dosahuje lepších mechanických vlastností než složky jednotlivě od sebe. Hotový laminát se ještě musí opatřit ochranou proti UV záření – Gelcoat. Může se to zajistit buď zvolením pojiva s UV stabilizátorem nebo pokrytím hotového výrobku lakem s ochranou proti UV záření. [3]

2.1. Matrice

Jedná se o zpevňující část výrobku. Přenáší vnější síly, které působí na komponent a definuje tvar budoucího výrobku. Jako matrice pro kompozity s vláknovou výztuží se využívají nejčastěji vlákna na bázi skla, uhlíku nebo aramidová vlákna (Kevlar®). Rozdíl mezi textiliemi je v jejich pevnostních charakteristikách, odolnosti vůči prostředí, cenové kategorii. Pevnostní charakteristiky textilie se vztahují k tzv. „gramáži“ (hmotnost na metr čtverečný). Jedná se o číslo, které charakterizuje vlastnosti tkaniny. Vyšší čísla znamenají tlustší pramence a tím pádem daná tkanina dokáže přenést větší zatížení než tkanina s nižším číslem. Jednotlivé pramence se rozlišují číslem „Tex“ (hmotnost jednoho kilometru pramence v gramech).

2.2. Pojivo

Jedná se obvykle o dvou složkové pryskyřice. Druhů syntetických pryskyřic je více (polyesterová pryskyřice, silikonové pryskyřice, atd.). Syntetická pryskyřice se smíchá s tvrdidlem v poměru udávaným výrobcem. Poměr se udává buď hmotnostní nebo objemový.

³ Gelcoat. Online. In: Element-shop. C2024. Dostupné z: <https://www.element-shop.cz/gelcoat/>. [cit. 2024-03-27].

V práci se využívá kombinace epoxidu L285 a tvrdidla H285 a epoxidu L285 s tvrdidlem H500 (hmotností poměr obou kombinací je 4:10). [4]

Důvod volby těchto dvou pryskyřic je z důvodu jejich nenáročnosti na ruční zpracování a schopnosti se vytvrzovat za běžné pokojové teploty.

2.3. Skelná tkanina

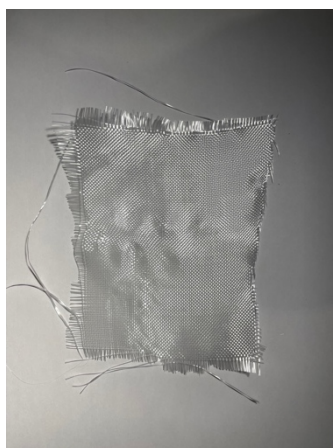
Nejčastěji využívanou tkaninou pro aplikace, kde nevádí relativně vysoký poměr pevnosti ku měrné hmotnosti jsou skelné tkaniny. Může se využít jak tkané, tak i netkané textilie. Tkaná textilie je složená z jednotlivých pramenců propletených mezi sebou. Netkaná je složenina jednotlivých vláken, bez určitého způsobu uspořádání mezi sebou.

Vlákna pro kompozity jsou vyráběná roztavením vysokomodulového E-skla, následným protlačením taveniny přes speciální trysky a vzniklá vlákna se zapletou do výsledné podoby. Počet jednotlivých vláken v jednom pramenci udává výslednou hmotnost textilie.

Skelná tkanina dobře odolává vysokým teplotám (krátkodobě cca 1200 °C). Aplikuje se jako materiál pro výrobu hasičských obleků. V letectví se často skelná tkanina využívá v kombinaci s uhlíkem. Skelná tkanina je jedním z nejlevnějších materiálů, pro výrobu kompozitů. [5]

⁴ Pryskyřice a tužidla. Online. In: Grm-systems.cz. C2024. Dostupné z: <http://www.grm-systems.cz/pryskyrice-tuzidla>. [cit. 2024-02-06].

⁵ Skelné tkaniny. Online. In: Element shop. C2024. Dostupné z: <https://www.element-shop.cz/skelne-tkaniny/>. [cit. 2024-03-27].



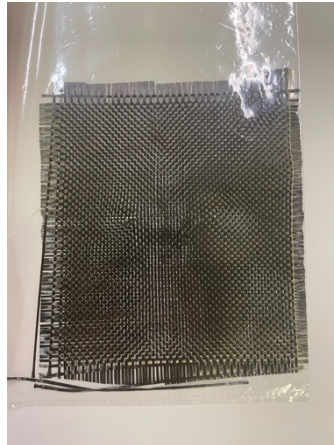
Obrázek 1 skelná tkanina

2.4. Uhlíková tkanina

Jedná se o materiál, který má vynikající poměr váhy k přenášenému zatížení. Uhlíková vlákna mají nižší měrnou hmotnost než ocel a několikrát lepší pevnost v tahu. Výroba daného materiálu se uskutečňuje postupným zvláknění anizotropních smol. Využívá se v leteckém průmyslu, automobilovém průmyslu (spoilery, nárazníky), motocyklovém průmyslu (rámy, přilby) a v mnoha dalších. Největší nevýhoda uhlíkových vláken je jejich cena.

Při práci s uhlíkovým vláknem se musí využít ochranných prostředků. Při obrábění konečného výrobku dochází k rozprášení mikroskopických částic do vzduchu a pokud se daný prach dostane do těla člověka, může mít za následek zhoršení průchodu dýchacích cest a karcinogenní účinky. [6]

⁶ *Uhlíkové tkaniny*. Online. In: Element shop. C2024. Dostupné z: <https://www.element-shop.cz/uhlikove-tkaniny/>. [cit. 2024-03-27].



Obrázek 2 Uhlíková tkanina

2.5. Aramidová tkanina

Aramidové vlákno je dnes známo pod názvem Kevlar[®]. Daným názvem se pojmenoval materiál, který objevila chemička Stephanie Kwolek ve firmě DuPont. Vyrábí se spřádáním vlákn z chemického roztoku a následně jsou hustě setkána do jednotlivých pramenců. Výsledkem je žárupevná, chemicky odolná, nárazu pevná látka (dobře pohlcuje rázovou energii). Má lepší mechanické vlastnosti než skelná tkanina. Cena je vyšší než u skelné tkaniny, ale nižší než u uhlíku.

Největší výhodou aramidových vláken je odolnost vůči vysokým tlakům. Proto jsou vhodné pro výrobu komponentu, které budou silně namáhány tlakem. U letadel se aramidové tkaniny využívají jako výztuže křídel a trupu. [7]

⁷ Co je kevlar a jak nás může ochránit? Online. In: ŠTĚPÁNKOVÁ, Barbora. <https://www.top-armyshop.cz>. 2021. Dostupné z: <https://www.top-armyshop.cz/magazin-co-je-kevlar-jak-nas-ochrani>. [cit. 2024-02-09].



Obrázek 3 Aramidová tkanina

2.6. Kombinované tkaniny

Za účelem získání lepších mechanických vlastností se mohou různé druhy pramenců kombinovat do jedné tkaniny. Jedná se o kategorii tak zvaných hybridních tkanin, kde se využívá výhod obou materiálů. Nejčastěji se setkává kombinace aramidových a uhlíkových pramenců. Aramid-uhlíkové tkaniny mají vynikající pevnostní charakteristiky uhlíkové tkaniny a výbornou odolnost vůči nárazům aramidové tkaniny. Využívají se především u sportovních motocyklu (přilby) nebo u nárazníku sportovních aut.



Obrázek 4 Aramid-uhlíková tkanina

3 ZPŮSOBY VÝROBY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLU

Jak bylo popsáno v první části, kompozit vzniká spojením matrice a pojiva. Existuje více způsobů, kterými lze dosáhnout konečného tvaru výrobku. V rámci práce se popíše pouze způsoby, které se aplikovaly na výrobu vzorku pro testování v laboratoři.

Laminovat by se mělo v halách, které splňují požadavky pro práci s epoxidovou pryskyřicí (musí se dodržet správná teplota, vlhkost vzduchu, a hlavně prostor musí být dobře větrán). Pracovní haly musí mít odsávací zařízení (vysokopodtlakové odsávání, vysavač), aby se zajistil odvod výparu a prachu vzniklého při výrobě a obrábění kompozitu. Úklid mikroskopického prachu je jedna z nejdůležitějších věcí, která z hlediska bezpečnosti práce musí být zajištěna. Kompozitní prach má ostré hroty, které se snadno dostávají do kůže a vyvolávají nepříjemné svrbění. Pokud se vdechnou, mohou proniknout do plic a vyvolat zdravotní komplikace.

Uskladnění matrice a pojiva musí být zajištěno v souladu s technickými listy udávanými výrobcem. Pokud tomu tak nebude, nelze zaručit, požadované mechanické vlastnosti u koncového výrobku. [8]

3.1. Výroba laminátu za pomoci vnitřních forem

Jedná se o jeden z nejčastějších způsobů výroby leteckých kompozitů. Pro výrobu formy se připraví speciální model, který odpovídá finálnímu tvaru vyráběného komponentu. Na základě modelu tzv. „kopyto“ se vyrobí forma, která zkopíruje tvar a proporce komponentu. Formy se mohou vyrobit dvou a více dílné (závisí na složitosti a velikosti výrobku).

Po zhotovení formy se musí připravit k dalšímu postupu práce. Před zahájením výroby by se měl na formu aplikovat ochranný povlak, který zabrání slepení výsledného kompozitu

⁸ *Nebezpečí výbuchu - výroba a obrábění plastů a kompozitních materiálů.* Online. In:

Www.bezpecnostprace.info. 2014. Dostupné

z: <https://www.bezpecnostprace.info/dokumentace/nebezpeci-vybuchu-vyroba-a-obrazeni-plastu-a-kompozitnich-materialu/>. [cit. 2024-02-09].

s formou. Pro výrobu kompozitu se musí do formy postupně vkládat předem připravená nastříhaná tkanina a postupně se prosycuje každá vrstva epoxidovou pryskyřicí. Pro výrobu kompozitu se může využít prepreg. V případě využití prepregu je postup obdobný. Počet vrstev a volba materiálu závisí na druhu zatížení, která bude daný prvek přenášet. Epoxidová pryskyřice má omezený čas, po který se může aplikovat, proto se vše musí připravit předem. Po uplynutí operačního času epoxidu se nesmí daná pryskyřice dál používat.

Po prosycení všech vrstev se výrobek buď nechá v hale, ve které byl vyroben, dokud nedojde k jeho plnému vytvrzení nebo se může přemístit do autoklávu, kde dojde k jeho vytvrzení za stanovených teplot a tlaku. Temperovaný kompozit má lepší mechanické vlastnosti. Teplota pro temperování a čas po který se musí kompozit „vypékat“ se uvádí v technických listech výrobce epoxidu.

Po vytvrzení kompozitu se vyjme polotovár z formy a začíná se povrchově upravovat (pokud to je zapotřebí). Pokud nedošlo k poškození formy během odebírání polotovaru, tak se daná forma může použít znovu. Vhodný způsob pro sériovou výrobu.



Obrázek 5 příprava formy pro vnitřní laminování



Obrázek 6 vložení separační fólie do formy



Obrázek 7 prosycená tkanina (pohled 1)



Obrázek 8 prosycená tkanina (pohled 1)

3.2. Výroba laminátu za pomoci vnějších forem

Pro výrobu kompozitu se může využít i vnějších forem. Postup výroby je o něco kratší než při využití vnitřních forem.

Vytvoří se model odpovídající tvaru a rozměru požadovaného výrobku. Pokud bude zapotřebí větší tloušťky stěn výrobku, tak se tloušťka vrstev musí odečíst od rozměrů modelu, aby nedošlo k vytvoření větších rozměrů polotovaru.

Model se umístí na určeno místo tak, aby nedocházel k žádnému pohybu modelu. Postupně se na něj aplikují předem připravené nastříhané tkaniny a následně se prosycují pryskyřicí. Po dokončení aplikování epoxidu se opět může využít vytvrzení za normálních teplot nebo se může využít autoklávu.

Po konečném vytvrzení se polotovar odejme od modelu. Pokud nedošlo k poškození, tak může být model znova použit.

3.3. Technologie výroby kompozitu

Jedním z nejjednodušších a nejrychlejších způsobů výroby kompozitního materiálu, je ruční vkládání vrstev textlie a její následné prosycení epoxidovou pryskyřicí. Rozdíl ve výrobě je v tom, že u tohoto způsobu není zapotřebí žádné další speciální zařízení (vakuové čerpadlo, lis, apod.). Využít se může jak vnějších, tak vnitřních forem. Daný způsob je efektivní u velkých a jednoduchých tvarů. Pokud je potřeba vyrobit složitý nebo přesný tvar polotovaru, tak daný způsob je nevýhodný. Po vložení textlie do formy a po prosycení, se při komplikovanějším tvaru formy, může povrch zvltnit a výsledný polotovar nedosáhne požadovaných vlastností. Nepřesný tvar výsledného polotovaru je způsoben schopností textlie se vracet do původního tvaru.

Při komplikovaných a složitých tvarech je výhodné využít metod, které zajistí přitlačení tkaniny k formě po celou dobu vytvrzování epoxidu. Způsobu, kterým se dá tkanina udržet ve tvaru nám požadovaném po celou dobu tuhnutí je více. V rámci práce se využívalo lisování a vakuování.

3.3.1. Výroba laminátu za užití vakuového zařízení

Při výrobě dílu, které mají složitý tvar a je zapotřebí zde dosáhnout co největší přesnosti, se využívá výroby za pomoci vakuového zařízení. Prvotní postup je stejný jako u předchozích způsobu. Musí se vyrobit model/forma, na které se nanese textilie a prosytí se epoxidovou pryskyřicí. Následuje umístění modelu pod speciální separační fólii a vložení do vakuového pytle. Poté se zajistí odsání vzduchu mezi pytle a modelem. Pro běžně připravované materiály se uvádí 0,6 – 0,8 bar vakua. Po vytvrzení polotovaru se odstraní fólie a polotovar s odebere z formy/modelu. Výhodou tohoto způsobu je vytvoření hladkého a přesného povrchu výrobku. Nevýhodou je náročnost na přesnost. Pokud dojde k úniku vakua, tak vzniklý výrobek bude nepřesný a bude se muset vyrobit znovu.

Při využití vakuového zařízení se musí hlídat tlak (pomocí vakuometru). V případě poklesu tlaku vakua, dojde k odlepení vrstev mezi sebou. Je také výhodné využít tmavé podložky, která v procesu vakuování bude prosvětlená. Daným způsobem se dá zjistit, zdá při aplikování pojiva na polotovar, nedošlo k vzniku bublinek vzduchu. Pokud ano, můžou být odstraněny dočasným přidáním procenta podtlaku. Způsob výroby za využití vakuového zařízení byl stanoven v souladu s normou ČSN EN 2374. [9]

⁹ EVROPSKÁ KOMISE PRO NORMALIZACI. ČSN EN 2374, *SKELNÉ LAMINÁTY A SENDVIČE - Výroba zkušebních desek*. 1. Praha, 1996.



*Obrázek 9 vakuové zařízení
(výroba vzorků-1)*



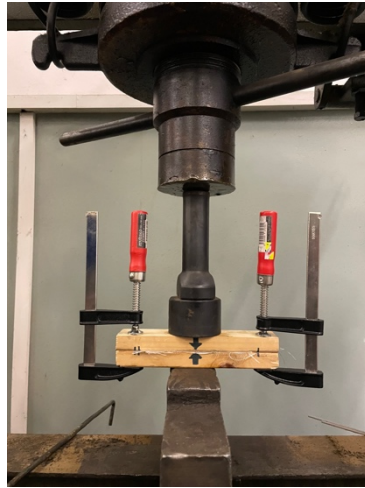
*Obrázek 10 vakuové zařízení
(výroba vzorků-2)*

3.3.2. Výroba laminátu pomocí lisovacího zařízení

Další způsob představený v dané práci je výroba kompozitu za pomoci lisování za studena. Jedná se proces výroby kompozitu za využití forem.

Do předem připravených forem se umístí tkaniny a prosytí se epoxidovou pryskyřicí. Po dokončení procesu aplikování materiálu se forma přikryje druhou stranou (protikus). Po dokončení přípravy a po vymezení umístění forem se na formu postupně začne aplikovat tlak z lisovacího stroje. Pro lisování za studena se uvádí tlak $0,3 - 10 \text{ kg/cm}^2$. Po kompletním vytvrzení polotovaru se odstraní horní část formy a polotovar se odebere ze spodní formy. Opět se formy dají znova použít, pokud nedošlo k jejich poškození. [10]

¹⁰ *Technologie výroby kompozitů*. Online. In: www.havel-composites.com. C2018-2024. Dostupné z: https://www.havel-composites.com/uploads/files/Technologie_vyroby_kompozitů.pdf. [cit. 2024-02-09].



Obrázek 11 lisovací stroj – 1 Obrázek 12 lisovací stroj - 2 Obrázek 13 lisovací stroj – 3

4 TYPY STRUKTUR KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ UŽÍVANÝCH V LETECKÉM PRŮMYSLU

V leteckém průmyslu se nejčastěji setkáme se několika typy struktur. První typ je laminát, který se užívá v práci při výrobě vzorků. Jedná se o strukturu, která se skládá z několika vrstev tkanin položených na sebe, případně s různou orientací pramenců ve vrstvách, (tkaniny mohou být z různých materiálů a mohou mít různou gramáž), prosycených vhodným pojivem (epoxidová pryskyřice, polyesterová pryskyřice,...).

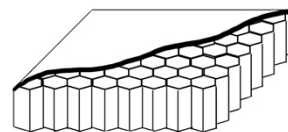
Druhý typ využívaný zejména u prvků zatížených velkou silou je sendvičová konstrukce. Jedná se o složení pevného povrchu (často ocel nebo kompozit na bázi uhlíkových vláken) a vnitřní jádro. Obvyklá skladba je jádro -> adhezivní vrstva -> povrchová vrstva. Sendvičová konstrukce se využívá u nosných rotorů vrtulníku za účelem zmenšení hmotnosti a zlepšení mechanických vlastností. Jako jádro se užívá struktura se vzorem šestihranu – tzv. voštinová struktura (podobné plástvi včelích úlu).



Obrázek 14 řez nosného rotoru vrtulníku - 1



Obrázek 15 řez nosného rotoru vrtulníku - 2



Obrázek 16 řez sendvičové konstrukce

5 NÁVRH VZORKŮ PRO ZKOUŠENÍ MATERIÁLU V PODMÍNKÁCH UNIVERZITY PARDUBICE

Pro výrobu vzorků skelných kompozitních materiálů se vycházelo z normy ČSN EN 2374 – skelné lamináty a sendviče – výroba zkušebních desek. V práci bylo využito dvou druhů epoxydových pryskyřic pro porovnání vlivů užitého pojiva na pevnost výsledného výrobku. Odzkoušené byly také různé vzorky tkaniny. Prováděla se tahová zkouška u vzorků se známým počtem pramenců, tahová zkouška na jednoho pramence a zkouška jednoho pramence přes kladku (norma ISO 3341).

5.1. Zkoušení skelného pramence přes kladku

Vycházelo se z normy ISO 3341 – Textile glass – Determination of breaking forces and breaking elongation. [11] Celkem se odzkoušelo více než 40 vzorků skelné tkaniny za využití různých způsobů upnutí, pro stanovení nejpřesnějších podmínek testování. Nejvíce přesný se ukázal způsob upnutí přes kladku s V drážkou. Vlivem namotání pramence na sebe, dochází k lepšímu upnutí a vzorek se během prvních 4-6 mm dotáhne ke kladce a nedochází k jeho smýkání po povrchu kladky.

Stroj pro zkoušení materiálu tahem byl užit Zwick/Z030. Parametry zkoušky: předpětí – 0, rychlost zatížení – 0,005 s⁻¹, rychlost pohybu příčnicku – 0,65 mm/s, poloměr kladky – 18 mm, délka upínaného vzorku – 2,5 m.

Délka vzorku mezi kladkami byla stanovena na 130 mm (vycházelo se rovnice [1]).

$$\varepsilon = \frac{v_p}{l_0} \rightarrow v_p = \varepsilon \times l_0 \rightarrow v_p = 0,65 \text{ mm/s}$$

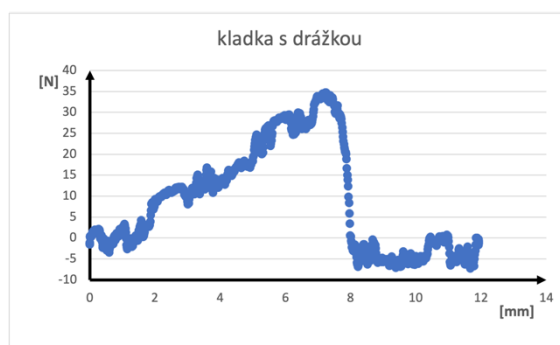
Rovnice 1 výpočet rychlosti posuvu příčnicku

Grafy, jenž jsou v příloze souboru, byly pořízeny během testování vzorků, za účelem stanovení optimálního způsobu pro zkoušení. Jak je znázorněno v grafech, způsobem testování přes kladku s V drážkou se dokázalo dosáhnout nejmenšího rozptylu síly při poměrně nízkém prodloužení vzorku. Většina vzorků se porušila „rozvětvením“ jednotlivých vláken. Shodné porušení všech vzorků svědčilo o správném provádění tahové zkoušky. Rozptyl hodnot v prodloužení je z důvodu postupného dotahování pramence ke kladce. Vzorky testovaných pramenců skelné tkaniny jsou označeny písmenem „P“ s číslem uvádějícím pořadí testování. Ukázka grafu tahové zkoušky je v příloze dokumentu (obrázek 36; 37; 38; 39; 40).

¹¹ ISO COPYRIGHT OFFICE. ISO 3341:2000, *Textile glass - Yarns - Determination of breaking force and breaking elongation*. 3. Switzerland, 2000.

	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6
Maximální zatížení materiálu	31 N	30 N	27 N	25 N	25 N	30 N
Prodloužení materiálu	8 mm	8,5 mm	9 mm	6,6 mm	8 mm	6,5 mm

Tabulka 1 porušení skelného vlákna



Obrázek 17 ukázka grafu, tahové zkoušky, přes kladku



Obrázek 18 kladka, pohled - 1



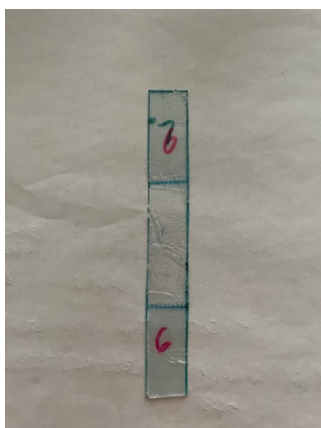
Obrázek 19 kladka, pohled - 1

5.2.1. Vzorek tkaniny prosycené epoxidovou pryskyřicí L285 + H285

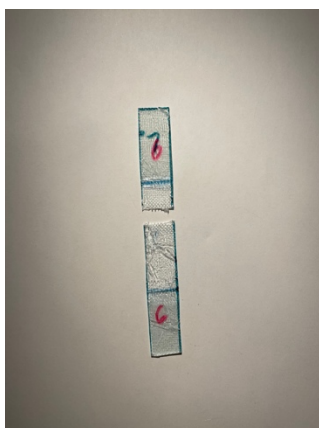
Pro výrobu vzorků se využila tkanina Aeroglass® 110 g/m². Návrh rozměru vzorku vycházel z normy ČSN EN 2747 – Sklem vyztužené plasty – Zkouška tahem. [12] Z důvodu stanovení přesnějších výsledků se využívalo vzorků se stejným počtem prosycených pramenců textilie. Vzorky se vyráběly ve vakuovém zařízení. Z důvodu přesnějších porovnání hodnot dvou rozdílných pojiv, se vzorky obou pryskyřic vyráběly najednou. Tím se vyloučil faktor ovlivnění chyby při výrobě.

Výhoda L285 + H285 je ve výrobě. Lépe se zpracovává, má menší viskozitu, takže prosycování tkanin je rychlejší. Doba použitelnosti epoxidu, než začne tuhnout, je vyšší než u L285 + H500. U kombinace L285 + H285, činní 50 minut. Pro zlepšení mechanických vlastností je možné daný druh pojiva vytemperovat. Teplota temperování je 50–55 °C.

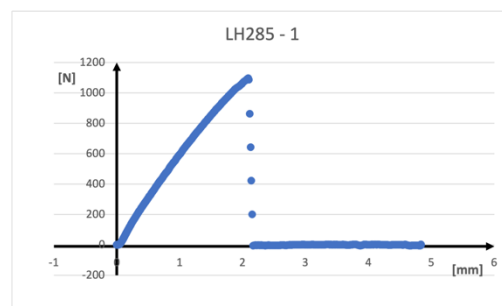
Vzorky prosycené epoxidovou pryskyřicí L285 a tvrdidlem H285 jsou označeny v tabulce [2] jako „LH285“ s číslem označujícím pořadí testování. Obrázky vzorků před a po tahové zkoušce a grafy tahové zkoušky jsou v příloze dokumentu (obrázek 41; 42; 43; 44; 45; 46; 47; 48; 49; 50; 51; 52)



Obrázek 20 vzorek tkaniny prosycené pryskyřicí před tahovou zkouškou



Obrázek 21 vzorek tkaniny prosycené pryskyřicí po tahové zkoušce



Obrázek 22 graf tahové zkoušky

¹² ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN 2747, Sklem vyztužené plasty - Zkouška tahem. 10. 1999.



Obrázek 23 proces výroby vzorků L285 + H285 a L285 + H500

5.2.2. Závěr zkoušky kombinace aeroglass 110 + L285 + H285

Při testování tahových vlastností skelné tkaniny 110 g/m² prosycené epoxidovou pryskyřicí L285 v kombinaci s tvrdidlem H285 se povedlo dosáhnout poměrně nízkého rozptylu při porušení vzorků. Prodloužení všech vzorků se pohybovalo v rozmezí od 1,6 do 2,2 mm. Zatížení potřebné k porušení vzorků se pohybovalo v rozmezí od 1096 N do 1210 N. Porovnání maximálního zatížení potřebného k porušení vzorků a prodloužení každého vzorku je znázorněno v tabulce [2].

vzorek	zatížení při poruše [N]	Prodloužení [mm]	rozptyl zatížení při poruše [%]	Rozptyl prodloužení při poruše [%]
LH285-1	1096	2	≅ 9%	≅ 27,3%
LH285-2	1161	1,9		
LH285-3	1178	1,6		
LH285-4	1210	2,1		
LH285-5	1162	2,2		

Tabulka 2 porušení vzorků L285 + H285

5.3.1. Vzorek tkaniny prosycené epoxidovou pryskyřicí L285 + H500 – Proces výroby a tahová zkouška vzorků

Druhý druh epoxidové pryskyřice užitý při výrobě vzorků pro srovnání mechanický vlastností materiálu a vlivu pojiva na výsledky. Tkanina využita pro výrobu vzorků byla Aeroglass® 110 g/m². Proces výroby je obdobný jako při využití L285 + H285. Doba zpracování daného epoxidu je kratší. Činí 10-15 minut.

Výroba vzorků se prováděla ve vakuovém zařízení (obrázek 23). Na rozdíl od L285 + H285, má L285 + H500 vyšší viskozitu. Prosycení matrice je pomalejší a vzhledem ke krátké době zpracovatelnosti je H500 méně univerzální než H285. Výhodou H500 je tuhnutí za nižších teplot než H285. H500 tuhne v rozmezí teplot od 10-25 °C. H285 se při nižších teplotách vytvrzuje o dost pomaleji než H500.

Daná teorie byla otestována na kamionu DAF XF 105. Byla zde provedená oprava komponentů způsobem, jenž je ochrannou známkou společnosti Adelweis. Z důvodu patentové ochrany nebude postup a princip opravy v práci popsán, ale během opravy bylo umožněno provést zkoušku tuhnutí pryskyřic za nižších teplot. Výsledkem bylo vytvrzení kombinace epoxidu L285 a tvrdidla H500 za cca 6 hodin a vytvrzení epoxidu L285 s tvrdidlem H285 za více než 8 hodin. Způsob, kterým se zjišťovalo vytvrzení epoxidu, byl za pomoci speciální jehly (princip Vicatova přístroje). Charakteristiky jehly podléhají pod ochrannou známkou společnosti.



Obrázek 24 oprava komponentu DAF XF 105

Při výrobě se vzorky označily jako LH500 s číslování 1 až 5. Prodloužení vzorků se pohybovalo v rozmezí od 2,2 mm do 2,4 mm. Síla potřebná k porušení vzorků byla od 1125 N do 1251 N. Porovnání výsledku je znázorněno v tabulce [3].

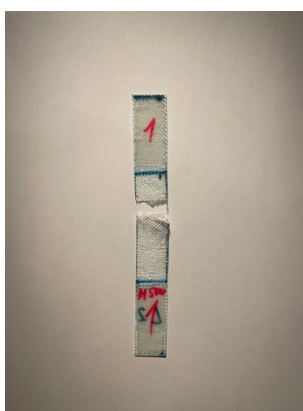
Obrázky vzorků a grafy tahové zkoušky jsou v příloze dokumentu (obrázek 53; 54; 55; 56; 57; 58; 59; 60; 61; 62; 63; 64)

vzorek	Zatížení při poruše [N]	Prodloužení [mm]	Rozptyl zatížení při poruše [%]	Rozptyl prodloužení při poruše [%]
LH500-1	1180	2,4	≅ 10 %	≅ 8 %
LH500-2	1251	2,4		
LH500-3	1125	2,4		
LH500-4	1249	2,2		
LH500-5	1198	2,4		

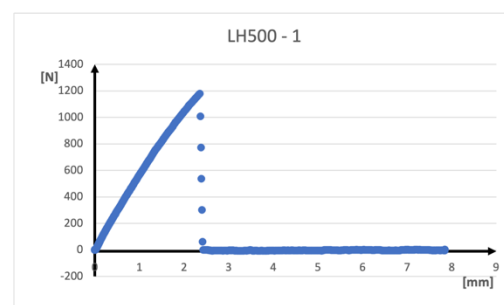
Tabulka 3 porušení vzorků L285 + H500



Obrázek 25 vzorek LH500-1 před tahovou zkouškou



Obrázek 26 vzorek LH500-1 po tahové zkoušce



Obrázek 27 graf tahové zkoušky vzorku LH500-1

5.3.2. Srovnání výsledku tahové zkoušky obou vzorků

Výsledky obou testovaných kombinací epoxidu při aplikaci na stejný druh tkaniny jsou dost obdobné. Cílem daného srovnání bylo zjistit, zdá se následujícím způsobem dají porovnávat obdobné materiály v podmínkách laboratoře Univerzity Pardubice, Dopravní fakulty Jana Pernera.

Jak je znázorněno v tabulce [2] a tabulce [3], rozptyl zatížení potřebného k porušení všech vzorků je menší než 15 %. Na základě nízké hodnoty rozptylu se dá tvrdit, že stanovený způsob je vhodný pro testování vzorků prosycených syntetickou pryskyřicí.

Způsob výroby vzorků pro testování se může lišit od způsobu použitého při vypracování práce. Doporučuje se vyrábět všechny vzorky najednou, jinak může dojít k chybě při výrobě a rozptyl může být vyšší, než jaký je uváděn v práci.

5.4. Testování vzorků uhlíkového kompozitu

Pro srovnání mechanických vlastností a pro stanovení způsobu testování kompozitu s maticí z uhlíkového vlákna, se využilo vzorků vyrobených z kombinace tkaniny HexForce® PrimeTex® 200 g/m² a epoxidové pryskyřice L285 + H285. Způsob výroby vzorků byl zvolen za pomoci vakuového zařízení. Rozměr byl převzat z normy ČSN EN 2561 – Plasty vyztužené uhlíkovými vlákny – zkouška tahem rovnoběžně se směrem vláken. [13] Počet pramenců jednotlivých vzorků se pohyboval v rozmezí od 12 do 14 pramenců. Rozptyl byl utvořen z důvodu srovnání rozdílů výsledku tahové zkoušky.

V místě upnutí se využilo přílozek ze skelné tkaniny Aeroglass® 110 g/m². V místě upnutí vzorku do čelistí zkušebního stroje se využilo skelné tkaniny, z důvodu jednodušší manipulace při výrobě. Skelná tkanina je světlá a je zde lépe vidět, zda se dokonale prosytily všechny vrstvy

¹³ EVROPSKÁ KOMISE PRO NORMALIZACI. ČSN EN 2561, *Letectví a kosmonautika - Plasty vyztužené uhlíkovými vlákny - Jednosměrné kompozity - Zkouška tahem rovnoběžně se směrem vláken*. 1. Praha, 1998.

laminátu. Způsob využití koncových příložek byl v souladu s normou. Tloušťka příložek byla vytvořena 0,3mm. Počet vrstev, skelné tkaniny z každé strany, činil tři vrstvy.

Způsob výroby byl obdobný jako u výroby vzorků kompozitu ze skelné tkaniny. Opět byla vytvořena deska, která se poté rozdělila na jednotlivé vzorky. U skelného kompozitu se při rozdělování mohlo využít strojů (především pásová pila). U uhlíkového kompozitu je riziko vzniku vysoké teploty a může dojít k uvolňování škodlivých výparů. Také se při strojním obrábění musí využít speciálních ochranných prostředků, kvůli uvolňování se mikroskopických částic (uhlíkového prachu) do ovzduší. Vybavení dílny nebylo dostatečně uzpůsobené těmto podmínkám, proto se využilo ručního obrábění a vzorky se rozdělily ruční pilkou.

Rozměry použitých vzorků a změny rozměrů po porušení, jsou definovány v tabulce [4]. Síly potřebné k porušení vzorků jsou uvedené v tabulce [5].



Obrázek 28 výroba vzorků uhlíkového kompozitu



Obrázek 29 výroba vzorků uhlíkového kompozitu - 2



Obrázek 30 vzorek uhlíkového kompozitu



Obrázek 31 porušení vzorku uhlíkového kompozitu



Obrázek 32 graf statické zkoušky uhlíkového kompozitu

vzorek	Vzorek před tahovou zkouškou			Vzorek po tahové zkoušce			Počet vláken
	Délka* [mm]	Šířka [mm]	Tloušťka [mm]	Délka* [mm]	Šířka** [mm]	Tloušťka [mm]	
C 1	100	26	0,5	103,5	25,7	0,44	12
C 2	100	27	0,45	103,9	26,6	0,39	13
C 3	100	29	0,48	104,1	28	0,45	14
C 4	100	27	0,49	103,7	26,5	0,43	13
C 5	100	26,8	0,495	103,8	26,25	0,37	13
C 6	100	26	0,465	103,8	25,7	0,39	12

Tabulka 4 parametry vzorků uhlíkového kompozitu

*délka před zkouškou = vzdálenost upínacích čelistí od sebe

*délka po zkoušce = prodloužení, odvozené z grafu tahové zkoušky

**šířka byla vypočítaná z průměrných hodnot, ve všech bodech porušení vzorku

Vzorek	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6
Zatížení [N]	4141	4863	5438	5261	4410	4473

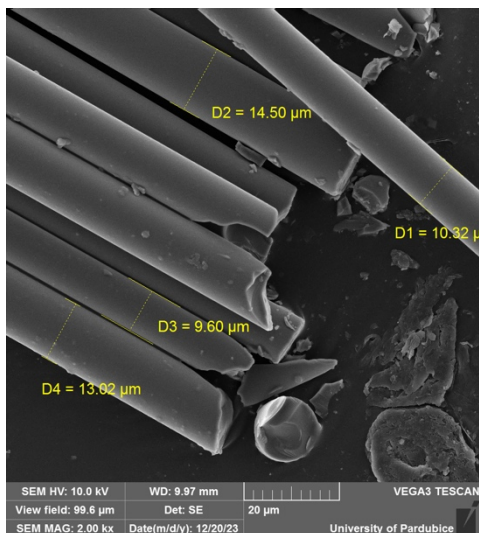
Tabulka 5 zatížení vzorků uhlíkového kompozitu

6. STANOVENÍ ZPŮSOBU MĚŘENÍ PRAMENCŮ V PODMÍNKÁCH DFJP UPCE

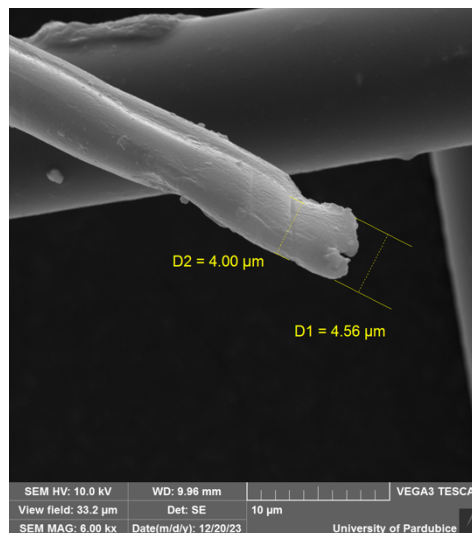
Způsob měření vzorků tkanin prosycených syntetickou pryskyřicí se definoval v předchozích kapitolách. V této části, se v práci, zaměřuje na způsob porovnání jednotlivých pramenců používaných při výrobě kompozitních materiálů. V rámci práce se zkoušely mechanické vlastnosti skelného pramence a uhlíkového pramence.

Způsob zjištění pevnostních vlastností pramence prostřednictvím tahové zkoušky, byl uskutečněn tahovou zkouškou přes kladku. Z důvodu vzniklého rozptylu při tahové zkoušce bylo zapotřebí stanovit způsob porovnání jednotlivých vláken mezi sebou.

První způsob, který se otestoval, bylo počítání průměru jednotlivých vláken pramence za pomoci digitálního mikroskopu. Následně se jednotlivé průměry mezi sebou sečtou a vzniklé hodnoty se přiřadí ke grafu odpovídajícímu pramenci.



Obrázek 33 výchozí stav vlákna



Obrázek 34 ukázka skelného vlákna po poruše

Tento způsob stanovení pevnosti se neosvědčil z důvodu náročnosti při stanovení průměru vláken. Při výpočtu průměru vzniká nepřesnost vlivem vzájemného se křížení vláken. Rozdělení jednotlivých vláken od sebe před vložení vzorku do mikroskopu by mělo za následek méně přesné výsledky.

Druhý způsob porovnání pramenců mezi sebou byl za pomoci zjištění hmotnosti jednotlivých vláken. Vážení pramenců bylo zajištěno za pomoci digitální váhy Kern 770. Vážení se provádělo na vzorcích před tahovou zkouškou. Za účelem vytvoření jednoznačných parametrů se hmotnost přepočítala na 1 metr pramence u všech testovaných vzorků. Přepočítané hmotnosti pramenců jsou uvedeny v tabulkách [6; 7]. Obrázky vážení vzorků jsou v příloze dokumentu pod čísly [65 až 82].

6.1. Měření skelných pramenců

Jako první, se způsobem popsaným na začátku kapitoly, otestovali skelné pramence. Vzorky pro testování se odebíraly ze skelné tkaniny Aeroglass® 110 g/m². Důvodem zvolení takto nízké gramáže tkaniny, bylo odzkoušení tenkých pramenců. Stanovený způsob testování tenkých

pramenců se může aplikovat na pramence větších průměru. Pokud by se testovali pramence větších průměru, tak by se nedalo jednoznačně tvrdit, že stanovený způsob by byl vhodný pro tenké pramence.

Pro ověření přesnosti zkoušení se otestovali pramence z tkaniny 350 g/m². Střední hodnota dosažená při tahové zkoušce a střední hodnota hmotnosti pramenců je uvedena v tabulce [6]. Fotografie stanovení hmotnosti pramenců, jsou uvedeny v příloze 1.

Aeroglass 110		Sklenná tkanina 350	
Hmotnost [g/m]	Zatížení [N]	Hmotnost [g/m]	Zatížení [N]
0,0726	28	0,6310	208

Tabulka 6 porovnání hmotnosti pramenců se zatížením potřebným k porušení vláken

6.2. Měření uhlíkových pramenců

Pro testování uhlíkových pramenců se využilo tkaniny HexForce® PrimeTex® 200 g/m². Na základě testování sklených pramenců a stanovení jednoznačného způsobu a jednoznačných parametrů zkoušky, se u uhlíkových pramenců využilo vyšší gramáže, za účelem jednoduššího provedení zkoušky.

Vlivem většího průměru jednotlivých vláken se mohlo využít kratších vzorků. Využilo se vzorků 1 metr dlouhých. Pro zajištění vlákna proti prokluzování po povrchu kladky se využilo oboustranné lepicí pásky. Daný způsob zajištění pramenců proti prokluzování je v souladu s normou ISO 3341. [14]

¹⁴ ISO COPYRIGHT OFFICE. ISO 3341:2000, *Textile glass - Yarns - Determination of breaking force and breaking elongation*. 3. Switzerland, 2000.

vzorek	Hmotnost [g/m]	Zatížení [N]
CP 1	0,2052	164
CP 2	0,1992	203
CP 3	0,2095	195
CP 4	0,2016	153
CP 5	0,2128	166
CP 6	0,2114	70*

*při tahové zkoušce došlo k poškození pramence, hodnota nebyla zahrnuta do průměru, z důvodu nepřesnosti údaje

Tabulka 7 porovnání hmotnosti jednotlivých vláken vůči zatížení potřebném k jejich porušení

Testování uhlíkových pramenců, za podmínek DFJP UPCE, s předběžným stanovením hmotnosti testovaného vzorku je možný za podmínek: pokud se vážení a tahová zkouška uskuteční následně za sebou, a pokud nedojde k viditelnému poškození jednotlivých vláken pramence. Pokud dojde k poškození jednotlivých vláken pramence, dochází k poměrně vysokému rozptylu hodnot.

Doporučení: pokud je zapotřebí zjistit poměr zatížení vůči hmotnosti pramence, je zapotřebí použít větší vzorek, který se rozdělí na dvě stejně velké poloviny. Jedna polovina se otestuje na tahové vlastnosti, druhá ke stanovení hmotnosti. Případně provést zkoušku hnedka po zvážení pramenců, aby nedošlo k porušení jednotlivých vláken.

6.3. Optimální parametry pro zkoušení vzorků pramenců matric kompozitních materiálu

V rámci práce se nejvíce optimálních parametrů, zkoušení jednotlivých pramenců, dosáhlo při zkoušce přes kladku s V drážkou. Parametry kladky a parametry zkoušky byly rozepsány v předchozích kapitolách. Tabulka [8] udává shrnutí všech uvedených parametrů zkoušení pramenců matrice kompozitního materiálu a zároveň může sloužit jako podklad pro testování pramenců v podmínkách výzkumného centra Dopravní fakulty Jana Pernera.

Materiál	Gramáž výchozího materiálu [g/m²]	Parametry vzorku Délka [m]	Parametry stroje	Způsob upnutí	Průměrné prodloužení (dosažené v práci)	Průměrné zatížení (dosažené v práci)
Skelný pramenec	110	2,5	$V_p = 0,65 \text{ mm/s}$ $l_0 = 130 \text{ mm}$ předpětí = 0	Kladka s V drážkou – r = 18 mm Omotání postupným utahováním se jednotlivých vrstev na sebe	9,3 mm	28 N
Skelný pramenec	350	1	$V_p = 0,65 \text{ mm/s}$ $l_0 = 130 \text{ mm}$ předpětí = 0	Kladka s V drážkou – r = 18 mm Přicházení k povrchu kladky za pomoci oboustranné lepící pásky	24,6 mm	208 N
Uhlíkový pramenec	200	1	$V_p = 0,65 \text{ mm/s}$ $l_0 = 130 \text{ mm}$ předpětí = 0	Kladka s V drážkou – r = 18 mm Přicházení k povrchu kladky za pomoci oboustranné lepící pásky	25,5 mm	185 N

Tabulka 8 parametry stanovené pro testování vláken kompozitních materiálu

7 TESTOVÁNÍ VZORKŮ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLU VYROBENÝCH MIMO DFJP UPCE

V předchozích kapitolách se popisovaly způsoby testování kompozitních materiálu vlastní výroby. Popisoval se proces testování komponentu vyráběných vzorků (testování matrice, porovnání epoxidových pryskyřic, atd...). Následně se popisovaly způsoby testování vlastních vzorků a určení optimálních podmínek pro provádění tahové zkoušky.

Tato kapitola se zaměří na způsoby testování vzorků kompozitů, které nejsou vyráběny v podmínkách DFJP UPCE. Tahová zkouška se prováděla na kompozitu s uhlíkovou matricí. Jednalo se o polotovary-lamelu, využívanou pro letecký průmysl. Název komponentu a název výrobce se v práci uvádět nebude.

Data pro porovnání výsledků udávaných výrobcem a výsledků získaných při tahové zkoušce se získaly z technických listů, dodávaných společně s polotovarem.

Při provedení první tahové zkoušky se nejdříve odzkoušel vzorek upnutý samostatně (bez koncových příložek). Tímto způsobem provedení zkoušky se dosáhlo vyšších parametrů zatížení, než jaké jsou uvedeny v technických listech výrobků.

Druhý způsob byl proveden s koncovými příložkami. Za účelem dosažení lepší přilnavosti materiálu a zabránění proklouznutí příložek, se uprostřed upnutí vytvořil otvor (\varnothing 10mm). Otvor se vyplnil netkanou textilií. V místě úchyty se využilo kombinace skelné textilie 110 + skelná textilie 350 + uhlíková textilie 200. Vše bylo následně prosyceno epoxidovou pryskyřicí a zalisováno. Způsob upevnění příložek pomocí centrálního otvoru se neosvědčil. Docházelo zde k odtržení jednotlivých vláken od sebe v místě utvořeného otvoru. Výsledné zatížení bylo nižší než bez koncových příložek.

Třetí způsob byl proveden také s koncovými příložkami. Před laminováním příložek, ale byla zabroušena vrchní vrstva epoxidu, za účelem kontaktu příložek s vláknem testovaného vzorku. Daný způsob „znovu laminace“ se využívá při opravách povrchů potahů letadel. Opravovaná vrstva se zabrušuje na vlákno a znova se prosycuje. Tento způsob je poměrně složitý z důvodu, že není jednoznačně určeno, jak moc se má zabrušovat povrch. V rámci tahové zkoušky se vzali vždy tři vzorky, které byly opracovány odlišnými způsoby. První trojice vzorků se zabrousila přesně na plochu uchycení čelistí zkušebního stroje. Druhá trojice vzorků se zabrousila na větší plochu tak, aby při upnutí vzorku do čelistí měli příložky přesah. Třetí trojice se otestovala

s přilepenými koncovými příložkami z oceli. Nedocházelo zde k předběžnému zabroušení povrchu. Daný způsob měl zamezit deformaci vzorků při upnutí do čelistí.

Jako nejvíce přesný se ukázal způsob zabroušení vzorku a utvoření koncových příložek s přesahem. Povedlo se zde dosáhnout zatížení vyššího, než uvádí výrobce.



Obrázek 35 vzorek uhlíkové lamely



Obrázek 36 vzorek uhlíkové lamely po porušení

Výrobce [MPa]	Laboratoř [MPa]
1400	1591,8
	1838,4
	1596,9

Tabulka 9 porovnání zatížení udávaného výrobcem a zatížení dosaženého při provedení zkoušky

8 ZÁVĚR

Téma dané práce bylo zvoleno z důvodu stále se rozvíjejících tendencí užití polymerních materiálu ve více odvětvích průmyslu. Kompozitní materiál je stále se rozvíjející prvek a stanovení způsobu, kterým se můžou testovat vlastnosti, se může dosti pomoci podnikům, které vyrábí součásti z kompozitu. Pokud budou statistiky a data ohledně pevnostních charakteristik, tak mnozí se od toho mohou odrážet při výpočtech pevnostních charakteristik.

Tato bakalářská práce, měla za úkol vymyslet a popsat způsob, kterým by se daly zkoušet kompozitní materiály v podmínkách UPCE DFJP. V rámci práce se stanovily způsoby separátního testování složek kompozitu, ale i testování pramenců prosycených syntetickou pryskyřicí. V rámci práce se testovala pouze epoxidová pryskyřice z důvodu nejčastějšího užití v letectví.

Zároveň se při vypracování práce povedlo stanovit způsob testování kompozitních materiálů vyrobených mimo Univerzitu Pradubice.

Celkově má práce posloužit jako návod, jakým způsobem se můžou testovat vzorky kompozitů a jak se dají případně mezi sebou porovnávat.

9 SOUPIS BIBLIOGRAFICKÝCH CITACÍ

MAR-BAL INC. *History of Composite Materials* [online]. North America, 2023 [cit. 2023-04-12]. <https://www.mar-bal.com/language/en/applications/history-of-composites/>. Dostupné z: <https://www.mar-bal.com/language/en/applications/history-of-composites/>

ŠTEKNER, Bedřich; CABRNOCH, Bohuslav; JIRONČ, Josef a POMPE, Vilém. Nové poznatky a výsledky v oblasti materiálu, technologií, zkoušek a aplikací kompozitu v leteckém průmyslu ČR. Online. *Transfer*. 2012, roč. 12.4.2012, č. 17, s. 45. Dostupné z: <https://www.vzlu.cz/wp-content/uploads/2021/03/file694.pdf>. [cit. 2024-02-06].

Gelcoaty. Online. In: *Element-shop*. C2024. Dostupné z: <https://www.element-shop.cz/gelcoaty/>. [cit. 2024-03-27].

Co je epoxid. Online. In: *Resinstudios.cz*. C2024. Dostupné z: <https://www.resinstudio.cz/jak-pracovat-s-epoxidovou-pryskyrici/co-je-epoxid/>. [cit. 2024-02-06].

Pryskyřice a tužidla. Online. In: *Grm-systems.cz*. C2024. Dostupné z: <http://www.grm-systems.cz/pryskyrice-tuzidla>. [cit. 2024-02-06].

Skelné tkaniny. Online. In: *Element shop*. C2024. Dostupné z: <https://www.element-shop.cz/skelne-tkaniny/>. [cit. 2024-03-27].

Uhlíkové tkaniny. Online. In: Element shop. C2024. Dostupné z: <https://www.element-shop.cz/uhlikove-tkaniny/>. [cit. 2024-03-27].

Technologie výroby kompozitů. Online. In: Wwww.havel-composites.com. C2018-2024. Dostupné z: https://www.havel-composites.com/uploads/files/Technologie_vyroby_kompozitu.pdf. [cit. 2024-02-09].

Co je kevlar a jak nás může ochránit? Online. In: ŠTĚPÁNKOVÁ, Barbora. <https://www.top-armyshop.cz>. 2021. Dostupné z: <https://www.top-armyshop.cz/magazin-co-je-kevlar-jak-nas-ochrani>. [cit. 2024-02-09].

Nebezpečí výbuchu - výroba a obrábění plastů a kompozitních materiálů. Online. In: Wwww.bezpecnostprace.info. 2014. Dostupné z: <https://www.bezpecnostprace.info/dokumentace/nebezpeci-vybuchu-vyroba-a-obrabeni-plastu-a-kompozitnich-materialu/>. [cit. 2024-02-09].

Technické charakteristiky epoxidové pryskyřice PourArt. Online. In: Wwww.obchodprobydleni.cz. C2024. Dostupné z: <https://www.obchodprobydleni.cz/epoxidove-pryskyrice/technicka-charakteristika/>. [cit. 2024-03-09].

Tvrdilo. Online. In: Wwww.e-barvy.com. C2024. Dostupné z: <https://www.e-barvy.com/epoxidove-lepici-pryskyrice/tvrdidlo/>. [cit. 2024-03-09].

9.1. Normy

ISO COPYRIGHT OFFICE. ISO 3341:2000, *Textile glass - Yarns - Determination of breaking force and breaking elongation*. 3. Switzerland, 2000.

EVROPSKÁ KOMISE PRO NORMALIZACI. ČSN EN 2374, *SKELNÉ LAMINÁTY A SENDVIČE - Výroba zkušebních desek*. 1. Praha, 1996.

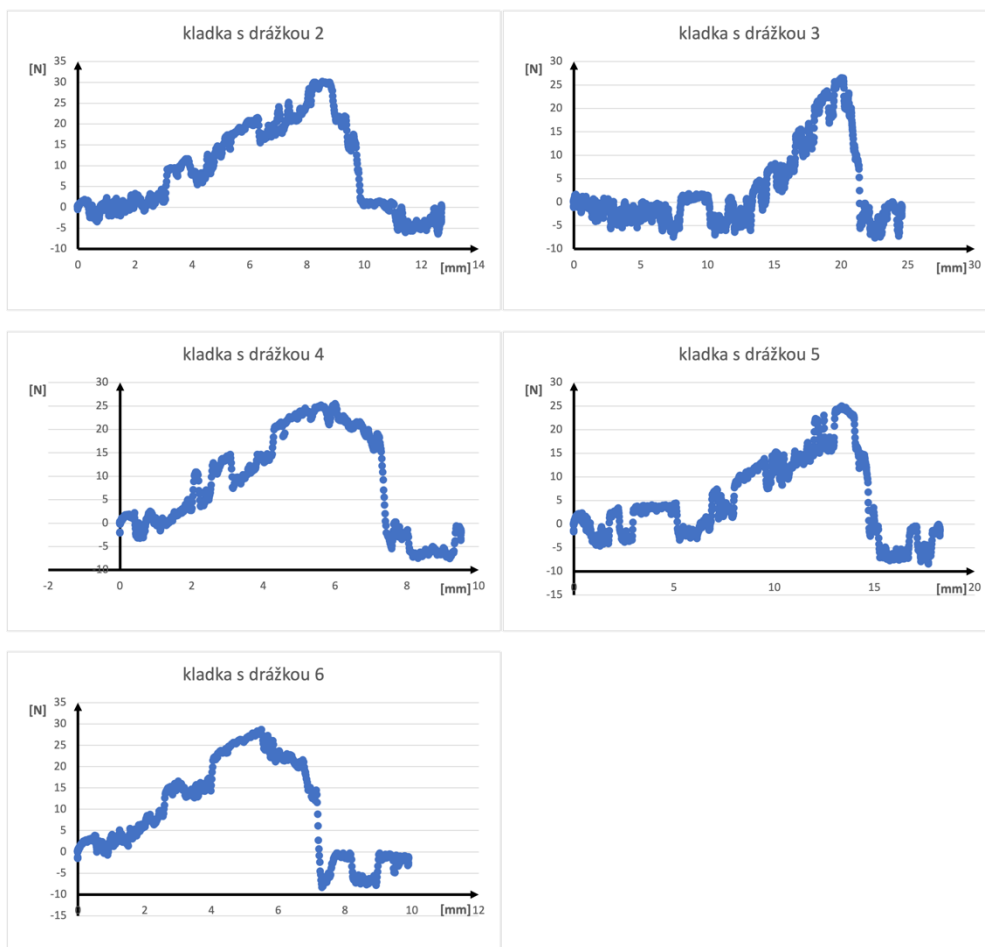
EVROPSKÁ KOMISE PRO NORMALIZACI. *Letectví a kosmonautika - Sklem vyztužené plasty - Zkouška tahem*. 1. Praha, 1999.

EVROPSKÁ KOMISE PRO NORMALIZACI. ČSN EN 2561, *Letectví a kosmonautika - Plasty vyztužené uhlíkovými vlákny - Jednosměrné kompozity - Zkouška tahem rovnoběžně se směrem vláken*. 1. Praha, 1998.

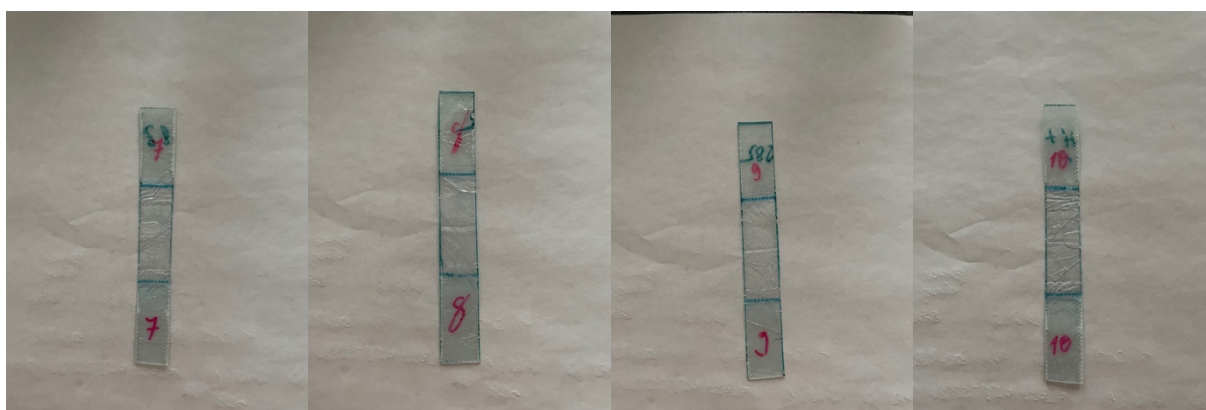
ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN 837 - 1, *Měřidla tlaku - část 1: Tlakoměry s pružnou trubicí - Rozměry, metrologie, požadavky a zkoušení*. 1. 1998.

ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN 2747, *Sklem vyztužené plasty - Zkouška tahem*. 10. 1999.

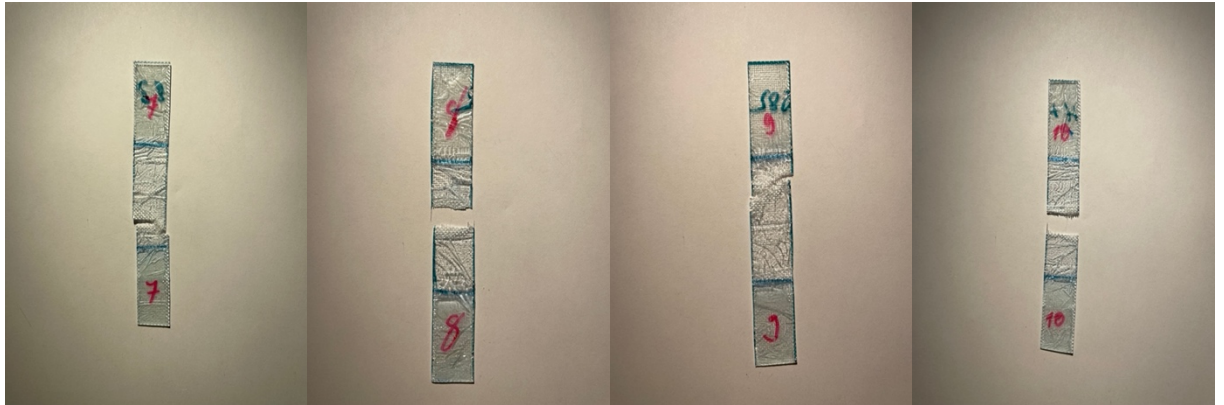
Příloha dokumentu



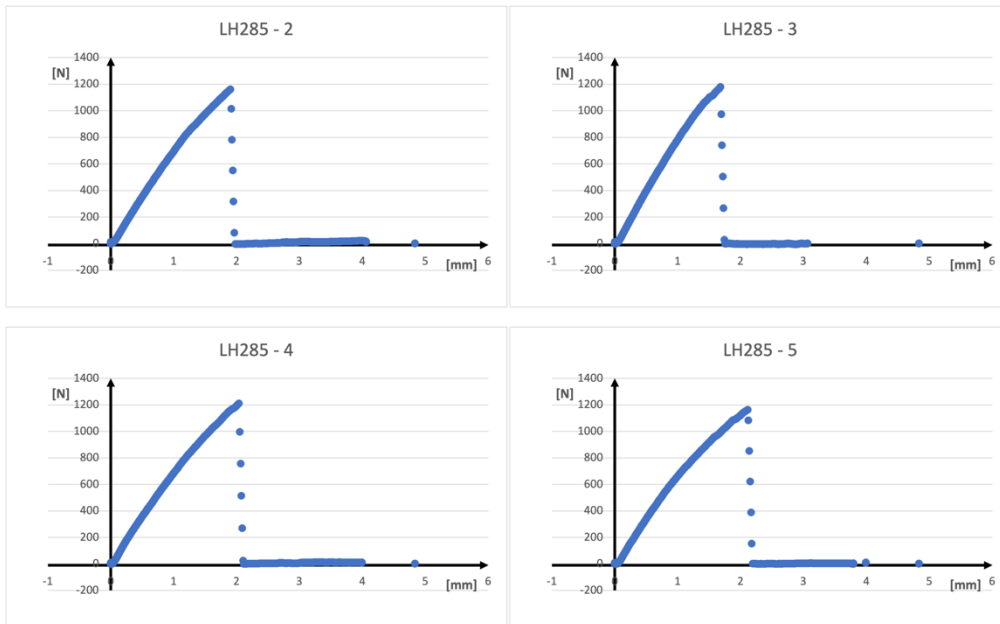
Obrázek [36; 37; 38; 39; 40] graf tahové zkoušky pramence přes kladku



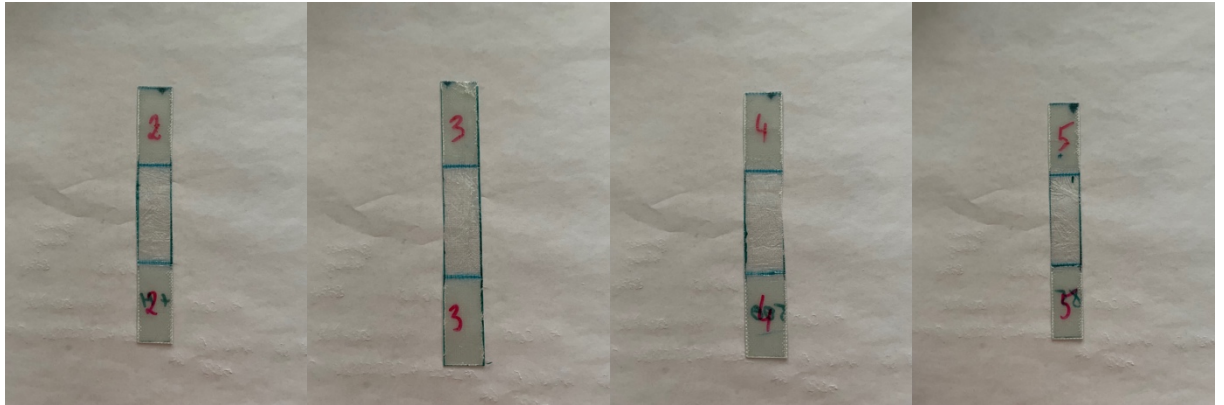
Obrázek [41; 42; 43; 44] Výchozí stav vzorku LH285



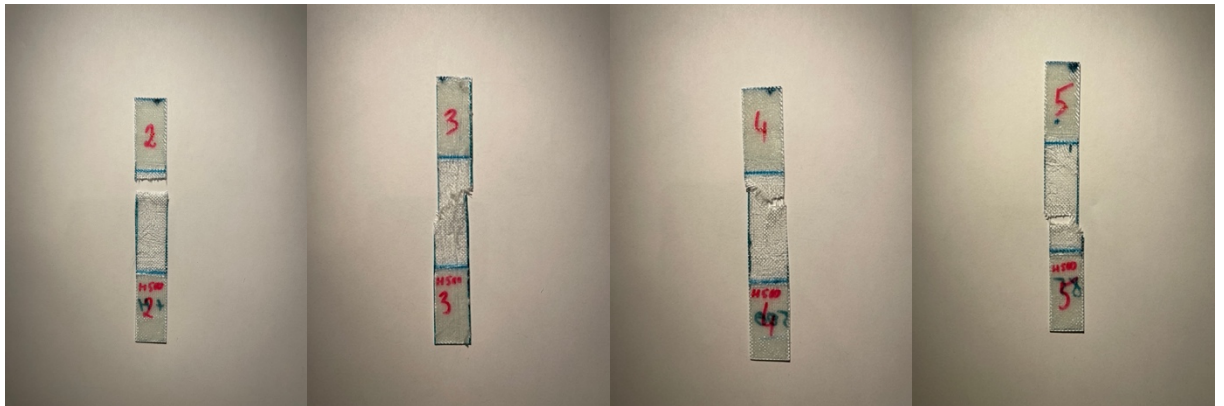
Obrázek [45; 46; 47; 48] vzorky po poruše LH285



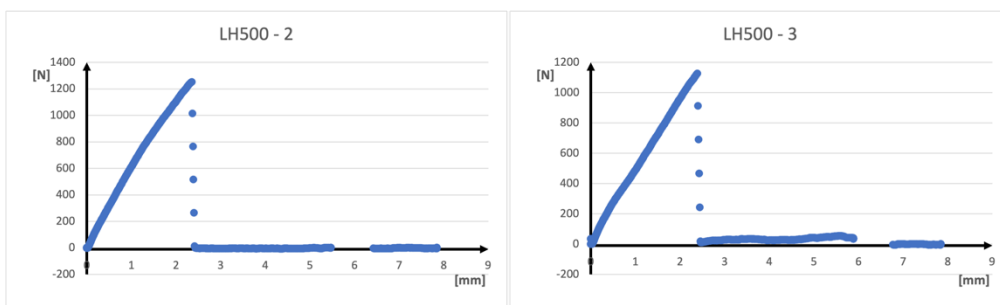
Obrázek [49; 50; 51; 52] grafy tahové zkoušky LH285

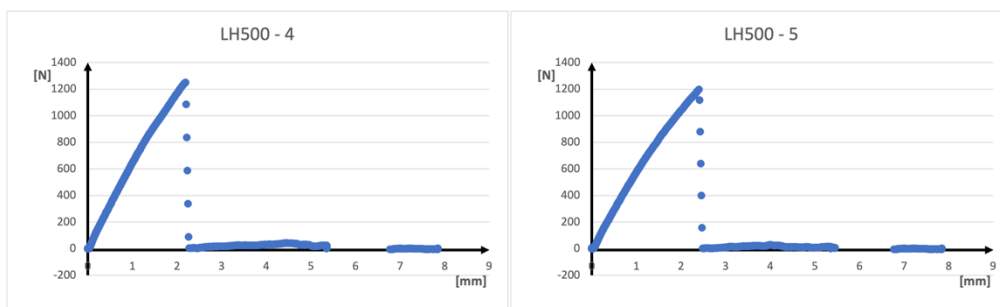


Obrázek [53; 54; 55; 56] vzorky [2] výchozí stav LH500



Obrázek [57; 58; 59; 60] vzorky [2] stav po poruše vzorků LH500





Obrázek [61; 62; 63; 64] grafy porušení vzorku LH500



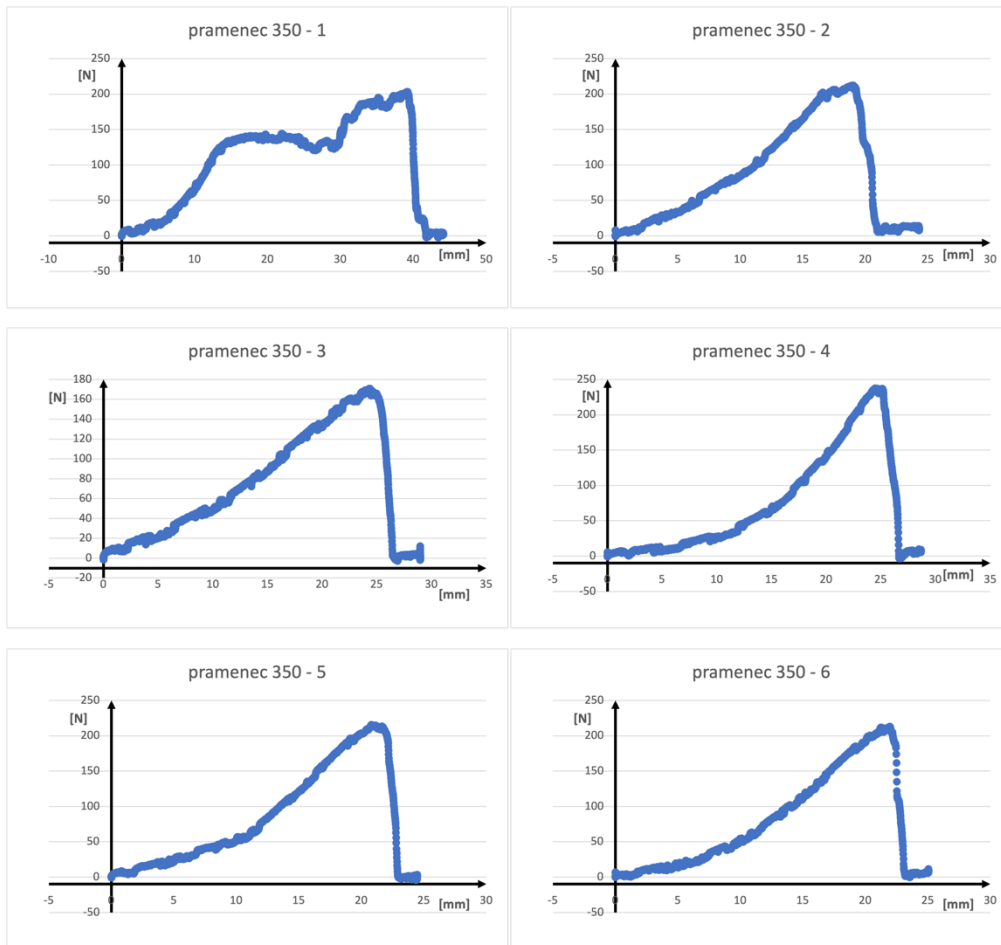
Obráze [65; 66; 67; 68; 69; 70] Aeroglass 110 – hmotnost pramenců



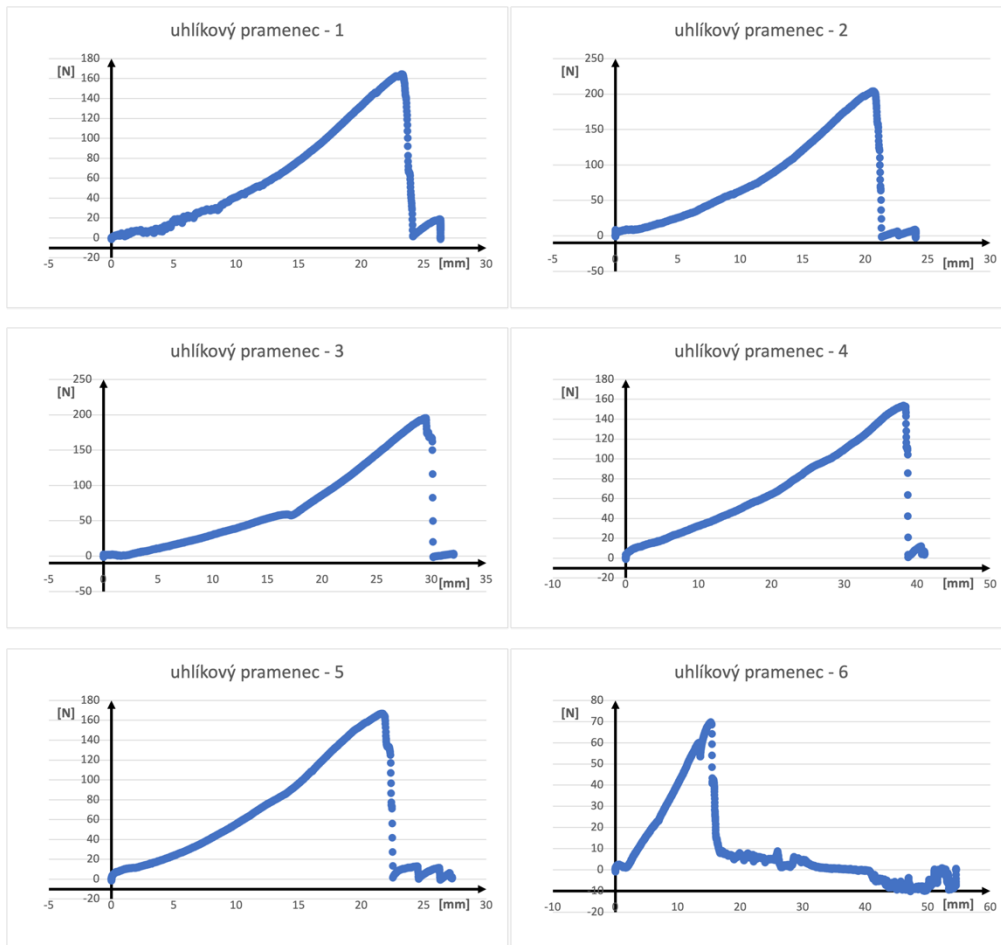
Obrázek [71; 72; 73; 74; 75; 76] Skelná tkanina 350 – hmotnost pramenců



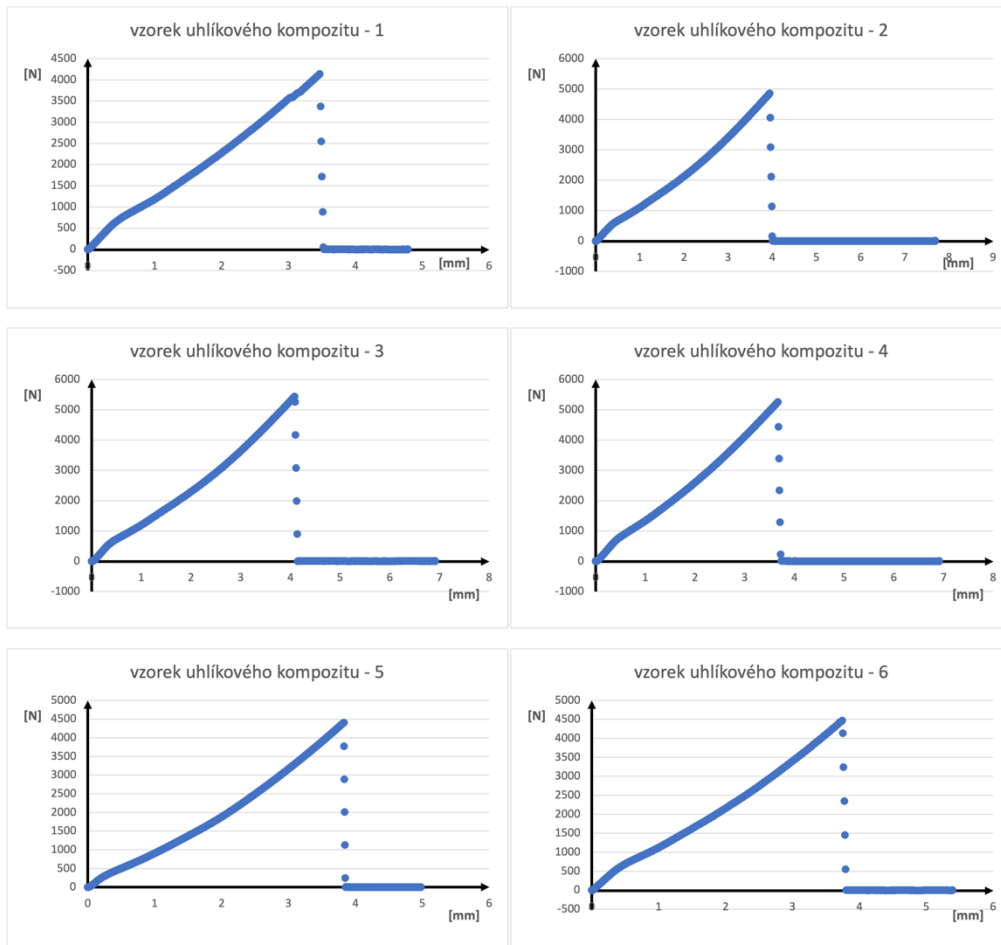
Obrázek [77; 78; 79; 80; 81; 82] uhlíková tkanina – hmotnost pramenců



Grafy tahové zkoušky pramenec skelné tkaniny 350



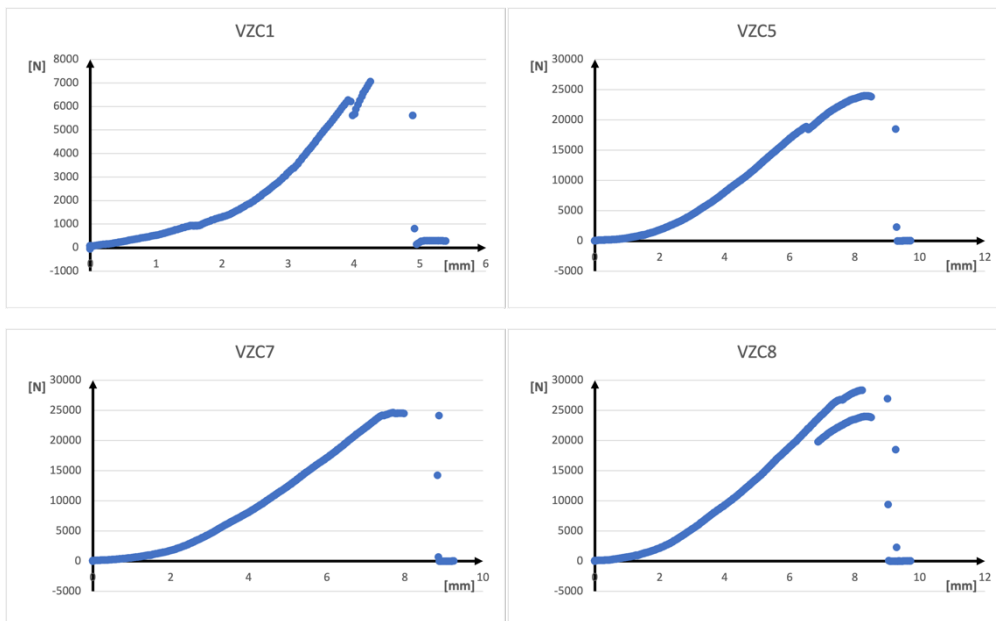
Grafy tahové zkoušky uhlíkového pramence 200

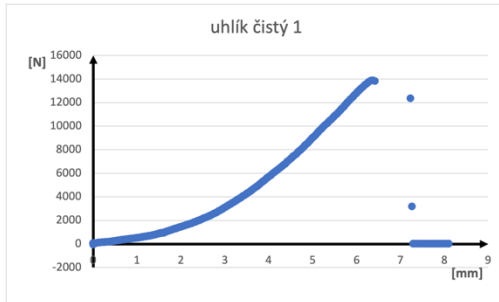
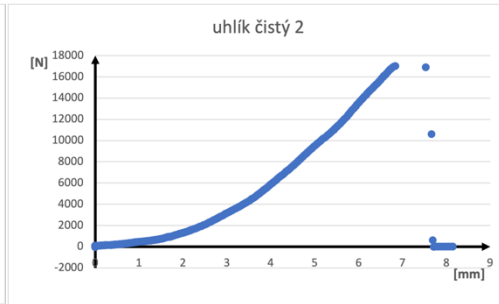
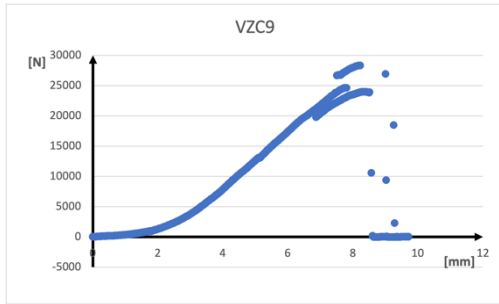


Grafy tahové zkoušky uhlíkového kompozitu



Vzorky uhlíkového kompozitu





Grafy tahové zkoušky uhlíkové lamely s různými způsoby uchycení vzorku v čelistech



Vzorky uhlíkové lamely