

UNIVERZITA PARDUBICE  
FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2017

Nikola Soukupová

Univerzita Pardubice

Fakulta chemicko-technologická

Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek

Oddělení syntetických polymerů, vláken a textilní chemie

Studium tahových vlastností vybraných kompozitních materiálů pro letectví  
s rozdílným typem výztuže

Nikola Soukupová

Bakalářská práce

2017

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Nikola Soukupová  
Osobní číslo: C14003  
Studijní program: B2829 Anorganické a polymerní materiály  
Studijní obor: Polymerní materiály a kompozity  
Název tématu: Studium tahových vlastností vybraných kompozitních materiálů pro letectví s rozdílným typem výztuže  
Zadávající katedra: Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek

### Zásady p r o v y p r a c o v á n í :

1. V literární rešerši přehledně popište používané kompozitní materiály s důrazem na různé typy výztuží a především pro použití v leteckém průmyslu.
2. V teoretické části se dále zaměřte na stručný přehled problematiky přípravy a zpracování kompozitních materiálu s přihlédnutím na využití při stavbě ultralightů.
3. Připravte jednotlivé vzorky různých typů kompozitních materiálů na bázi epoxidové pryskyřice s rozdílnými výztužemi.
4. Studujte vliv jednotlivých typů výztuží v připravených kompozitních materiálech na tahové vlastnosti a sledujte jejich teplotní závislost.
5. Srovnajte a diskutujte zjištěné výsledky tahových vlastností v závislosti na typu výztuže a teplotě.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Luboš Prokůpek, Dr.**

Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek


Datum zadání bakalářské práce: **2. prosince 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. července 2017**



prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.  
děkan

L.S.



Ing. David Veselý, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 28. února 2017

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byla jsem seznámena s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, 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 o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne

Nikola Soukupová

## PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych poděkovat Ing. Luboši Prokúpkovi, Dr. za vedení mé bakalářské práce, cenné rady a odborný dohled. Děkuji také firmě ATEC v.o.s. za poskytnutí vzorků, jmenovitě především panu Václavu Soukupovi.

## **ANOTACE**

Tato bakalářská práce je věnována vybraným kompozitním materiálům se zaměřením na letecký průmysl, a to především výrobu ultralightů. V literární rešerši jsou představeny vybrané materiály, jejich výroba a následně zpracování různými způsoby laminování. Experimentální část se zabývá přípravou vybraných kompozitních vzorků a studiem tahových vlastností jednotlivých typů výztuží v závislosti na teplotě.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

kompozity, letectví, tahové vlastnosti, uhlíkové tkaniny, skelné pásy, korek, epoxidové pryskyřice

## **TITLE**

Study of tensile properties of selected composites materials for aviation with a different types of reinforcement

## **ANNOTATION**

This bachelor work is devoted to selected composite materials focusing on the aircraft industry, especially for production of ultralights. In the literary background research are introduced selected materials, their production and then processing of some different ways of lamination. Experimental part is devoted to preparation of selected composite specimens and by studying the tensile properties each types of reinforcement depending on the temperature.

## **KEY WORDS**

composites, aviation, tensile properties, carbon fabrics, glass tapes, cork, epoxide resins

## OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ .....	17
SEZNAM TABULEK.....	18
SEZNAM GRAFŮ .....	18
SEZNAM ZKRATEK.....	19
1 ÚVOD .....	12
2 TEORETICKÁ ČÁST.....	13
2.1 Definice kompozitních materiálů .....	13
2.2 Materiály využívané pro kompozity.....	14
2.2.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice .....	14
2.2.2 Epoxidové pryskyřice.....	15
2.2.3 Gelcoat .....	18
2.3 Separátory forem .....	19
2.3.1 Vosky .....	19
2.3.2 PVA – ECO.....	19
2.4 Vlákna.....	20
2.4.1 Uspořádání vláken – suchá forma .....	20
2.5 Druhy vláken .....	24
2.5.1 Aramidová vlákna .....	24
2.5.2 Borová vlákna .....	25
2.5.3 Skleněná vlákna.....	25
2.5.4 Uhlíková vlákna .....	27
2.5.5 Grafitová vlákna.....	30
2.5.6 Korek.....	31
2.6 Zvlákňování.....	31
2.7 Technologie laminování .....	31
2.7.1 Autokláv .....	31
2.7.2 Vakuování .....	32
2.7.3 Lisování.....	33
2.7.4 Otevřená forma lití .....	34
2.7.5 Kontaktní ruční laminování.....	34
2.7.6 Stříkání .....	35
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	36
3.1 Použité materiály .....	36
3.1.1 Epoxid L 285 .....	36



3.1.2	Tužidlo 285 .....	36
3.1.3	Araldit AW106 a tužidlo HV953U .....	37
3.1.4	Araldit 2014 (AW139 + XB5323) .....	37
3.1.5	PVA.....	38
3.1.6	Skelná páska .....	38
3.1.7	Uhlíková páska .....	38
3.1.8	Uhlíková tkanina .....	38
3.1.9	Korek.....	39
3.1.10	Nerezová ocel.....	39
3.1.11	Překližka.....	39
3.1.12	Perchlor .....	40
3.2	Výroba vzorků .....	40
3.2.1	Příprava plechů.....	40
3.2.2	Příprava skelných a uhlíkových pásků .....	40
3.2.3	Příprava sendvičů uhlík-korek .....	42
3.3	Metodika měření .....	43
3.3.1	Trhací stroj MTS-4/M .....	43
4	VÝSLEDKY .....	45
4.1.1	Skelná páska .....	45
4.1.2	Uhlíková páska .....	45
4.1.3	Uhlíkový sendvič s korkovou výplní s vlákny orientovanými 90° ve směru tahu 47	
4.1.4	Uhlíkový sendvič s korkovou výplní s vlákny orientovanými 45° ve směru tahu 47	
5	ZÁVĚR.....	50
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	51

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Synergické chování složek kompozitu [1].....	13
Obrázek 2 Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrického tvaru výztuže [1] .....	14
Obrázek 3 Epoxidová skupina [3].....	16
Obrázek 4 Syntéza epichlorhydrinu s Bisfenolem A [9].....	16
Obrázek 5 Síťování epoxidové pryskyřice pomocí aminu [3] .....	17
Obrázek 6 Uhlíkový roving [17] .....	20
Obrázek 7 Netkaná textilie [8] .....	21
Obrázek 8 Druhy tkaných textilií: plátno, košík, kepr, atlas [18] .....	22
Obrázek 9 Uhlíková páska [19].....	23
Obrázek 10 Ilustrace výroby prepregů [8] .....	23
Obrázek 11 Polymerní struktura aramidových vláken [8] .....	24
Obrázek 12 Schématické znázornění procesu výroby skelných vláken [8] .....	26
Obrázek 13 Závislost mechanické pevnosti na elastického modulu pružnosti [26] .....	28
Obrázek 14 Mokrý zvlákňování pro tvorbu akrylových vláken [25] .....	29
Obrázek 15 Zvlákňování z taveniny používané pro výrobu mezofázových uhlíkových vláken [25] .....	30
Obrázek 16 Autokláv [30].....	32
Obrázek 17 Vakuové prosycování [29].....	33
Obrázek 18 Lisování pomocí vakuování [29] .....	33
Obrázek 19 Lisování [29].....	34
Obrázek 20 Příklad kontaktního laminování [29] .....	35
Obrázek 21 Proces stříkání [29] .....	35
Obrázek 22 Vzorec tetrachlorethylenu [42] .....	40
Obrázek 23 Nastříhané skelné a uhlíkové pásy.....	40
Obrázek 24 Prosycená skelná tkanina .....	41
Obrázek 25 Prosycená uhlíková tkanina .....	41
Obrázek 26 Zatížení skelné tkaniny .....	41
Obrázek 27 Zatížení uhlíkové tkaniny .....	41
Obrázek 28 Zbroušené konce vzorků.....	42
Obrázek 29 Lepení plechů na uhlíkovém vzorku.....	42
Obrázek 30 Lepení plechů na skelném vzorku .....	42
Obrázek 31 Vzorky sendviče uhlík-korek z pohledu tkaniny 98 g/m <sup>2</sup> pod úhly 90° a 45° .....	43
Obrázek 32 Vzorky sendviče uhlík-korek z pohledu tkaniny 160 g/m <sup>2</sup> pod úhly 90° a 45° ....	43

Obrázek 33 Trhací stroj MTS - 4/M.....	44
Obrázek 34 Tepelná komora Chaixmeca FC S42.....	44

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Podrobnosti pro zpracování [10].....	18
Tabulka 2 Vlastnosti vybraných tužidel 285, 286, 287 [10].....	18
Tabulka 3 Míchací poměry pryskyřice a tužidel [10].....	18
Tabulka 4 Vlastnosti vybraných aramidových vláken v závislosti na teplotě [23].....	25
Tabulka 5 Rozdělení uhlíkových vláken dle mechanických vlastností [26].....	28
Tabulka 6 Vlastnosti tužidla 285 [10].....	37
Tabulka 7 Vlastnosti Aralditu 2014 [36].....	37
Tabulka 8 Vlastnosti skelné pásky [37].....	38
Tabulka 9 Vlastnosti použitých uhlíkových tkanin [39].....	39
Tabulka 10 Výsledky měření skelné pásky.....	45
Tabulka 11 Výsledky měření uhlíkové pásky.....	45
Tabulka 12 Výsledky měření uhlíkového sendviče s korkovou výplní a vlákny umístěnými pod úhlem 90°.....	47
Tabulka 13 Výsledky měření uhlíkového sendviče s korkovou výplní a vlákny umístěnými pod úhlem 45°.....	48

## SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Závislost meze pevnosti na teplotě pro uhlíkovou a skelnou pásku.....	46
Graf 2 Závislost tažnosti na teplotě pro skelnou a uhlíkovou pásku.....	47
Graf 3 Závislost meze pevnosti na teplotě pro vzorky sendviče uhlík - korek s vlákny umístěnými pod úhly 45° a 90° ve směru tahu.....	48
Graf 4 Závislost tažnosti na teplotě pro vzorky sendviče uhlík - korek s vlákny umístěnými pod úhly 45° a 90° ve směru tahu.....	49

## **SEZNAM ZKRATEK**

BADGE – diandiglycidylether

CAPS – Cirrus Airframe Parachute System – společnost vyrábějící letadla

DETA – diethylentriamin

HM – vysoce elastický typ modulu

HT – standardní elastický modul

IM – středně elastický modul

IPDA – isophorondiamin

IUPAC – Mezinárodní unie pro čistou a aplikovanou chemii

LM – nízko elastický modul

PAN – polyakrylonitril

PPD-T – poly(p-fenylentereftalamid)

PVA – polyvinylalkohol

TETA – triethylentriamin

UD – jednosměrná vazba vláken

UHM – ultra vysoce elastický modul

# 1 ÚVOD

V současné době se ultralighty stávají stále více rozšířené, a i když ještě nalezneme spoustu kovových a dřevěných, tak již více jak 20 let se na našem trhu vyskytují i kompozitové. To, že jich není moc, je způsobeno právě složitostí výroby, ke které jsou za potřebí zkušenosti a experimentování, což znamená investovat. Investice se ovšem vrací v podobě nádherných aerodynamických strojů, které jsou nejen pevné, ale zároveň i lehké, což je u této kategorie, kde je potřeba dodržet vzletovou váhu do 450 kg, tedy váhu letadla s palivem a posádkou, velmi důležité. Pro představu váha samotného vybaveného letadla se pohybuje okolo 250 kg, když se k tomu připočte 50 l paliva a 2 členové posádky při průměrné váze 80 kg, tak se opravdu velice snadno tato váha překročí.

Jelikož se jedná o letadlo, které ve vzduchu při poruše se nemůže odstavit, jako auto na okraji vozovky a počkat na odtah, tak je zde kladen velký důraz na pevnost a perfektní chod všech technických zařízení. A proto jsou zde zavedeny přísné pevnostní limity, které jsou ještě náročnější pro kompozitové ultralighty, než-li pro ty „kovové“. Je to dáno tím, že kompozity jsou relativně nové, neví se přesně jak se daný materiál bude chovat za delší dobu, nedá se u nich jednoduše nalézt případné vady v konstrukci, jako jsou vnitřní trhliny, a tak místo toho, aby se využilo výborných vlastností kompozitů k lepšímu odlehčení, tak se byrokraticky zhoršují.

Ultralighty se proto podrobují, vždy po dokončení vývoje, zátěžovým zkouškám jako celek. Což znamená, že se upevní celý drak letadla na jeřáb a např. na křídla se umístí pytle s pískem a zkoumá se jaké zatížení daná křídla vydrží. Nicméně to znamená, že se netestují zvlášť jednotlivé používané materiály. A proto je toto téma bakalářské práce věnováno testování vybraných kompozitních materiálů používaných pro ultralighty, pevnostní zkouškou v tahu.

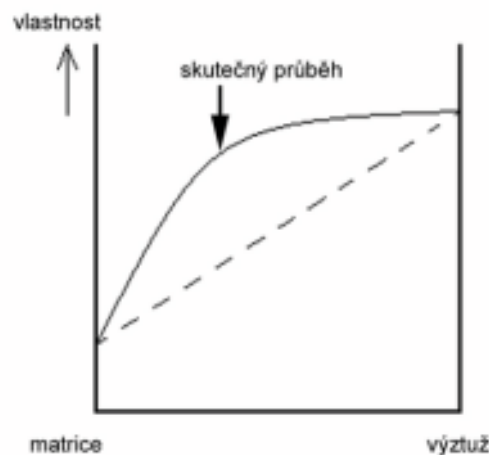
Jedná se o pásky z uhlíkové a skelné tkaniny s jednosměrným uspořádáním vláken, což zaručuje vysokou pevnost v tahu, a takzvaný sendvič, což je kompozit s více druhy výztuže, v tomto případě jsou to dva typy uhlíkové tkaniny a mezi nimi plát korku. Tento sendvič však nemá význam pevnostní, nýbrž slouží jako podpora.

Avšak na českém trhu se vyskytuje několik typů kompozitových ultralightů a každý výrobce má svoje „know-how“, které si střeží jako oko v hlavě, a tak nelze zaručit, že všechny testované materiály v této práci mohou být nalezeny ve všech typech kompozitových ultralightů a ještě k tomu vždy na stejných místech, samozřejmě pokud někdo někomu neukradne technologii, i to se občas stává, proto je toto odvětví výroby tak fascinující, plné výzev, a tak trochu hazard.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Definice kompozitních materiálů

Kompozitním materiálem se rozumí tzv. heterogenní materiály, které vznikly spojením dvou či více různých fází, ty se liší svými mechanickými, chemickými i fyzikálními vlastnostmi. Rozlišují se podle toho, zda je fáze spojitá, v tom případě se nazývá matrice, nebo nespojitá, nazývaná výztuž. Ta má v porovnání s matricí lepší mechanické vlastnosti. Mezi přírodní kompozity lze řadit dřevo, které má jako výztuž celulózová vlákna a matrici ve formě ligninu. Významnou charakteristikou, kterou se kompozity vyznačují je tzv. synergismus (viz Obrázek 1), což znamená, že výsledné vlastnosti jsou lepší, než kdybychom sečetli dílčí vlastnosti jednotlivých fází. Díky tomuto jevu můžeme objevovat nové materiály s lepšími výslednými vlastnostmi.



Obrázek 1 Synergické chování složek kompozitu [1]

Všeobecně kompozitní materiály lze rozdělit dle typu výztuže a dle matrice. Z hlediska geometrického tvaru se rozdělují výztuže na částicové a vláknové (viz Obrázek 2), které lze ještě rozdělit na kompozity s krátkými a dlouhými (kontinuálními) vlákny. Částicové se vyznačují tím, že jeden rozměr útvarů výztuže nepřesahuje ostatní rozměry. Tvar může být destičkovitý, tyčinkovitý, kulovitý, nebo nepravidelný. Zlepšují vlastnosti jako je tvrdost, odolnost při zvýšených teplotách a otěruvzdornost. Mezi rozšířené částicové výztuže se řadí ty kovové. Vláknové výztuže mají naopak jeden rozměr výrazně odlišný. Od toho se odvíjí i jejich možnosti uspořádání; např. jednosměrné (roving) nebo rohože. Tyto výztuže jsou charakteristické vysokou pevností v tahu, modulem pružnosti a někdy i houževnatostí. Typy

vláken jsou buď anorganická (uhlíková, borová, skleněná), nebo organická – polymerní (aromatické polyamidy, polyethylen atd.).



Obrázek 2 Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrického tvaru výztuže [1]

Dalším faktorem je již zmíněná matrice. Těch je několik druhů a základní se rozdělují na ty s kovovou, polymerní a keramickou maticí. U kovových matic se nejvíce využívají lehké slitiny hliníku, titanu a hořčíku pro své vlastnosti – tvárnost a houževnatost. Pro elektrotechnické účely se používají slitiny mědi a stříbra. Slitina niklu je pak využita u kompozitů, které musí odolat velmi vysokým teplotám. Výhoda polymerních matic je nízká hustota a naopak nevýhodou nízká tepelná stabilita. Významnými reaktoplasty jsou polyesterové nebo epoxidové pryskyřice. Dále keramické jsou známé pro svou velkou tvrdost, ale zároveň křehkost. Jejich hlavním přínosem je odolávání velmi vysokým teplotám. Řadíme mezi ně matrice na bázi oxidů ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , oxidická skla) nebo jiná (SiC, C). [1]

## 2.2 Materiály využívané pro kompozity

### 2.2.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice

Pryskyřice, které vznikají řetězovou reakcí obvykle ve styrenu popřípadě vinyltoluenu, methylmethakrylátu, nebo dialkylftalátu, jedná se tedy o roztoky nenasycených lineárních polyesterů v monomerech. Oproti epoxidovým pryskyřicím jsou levnější, ale nejsou dobře odolné na povětrnosti, mají nižší modul pevnosti a po vytvrzení se více smršťují. Výběrem síťovacího činidla (obvykle styren) a iniciátoru se může upravit například zda má být polyester vytvrzen při pokojové či zvýšené teplotě. Styren je zde až z 50 % a snižuje viskozitu, díky čemuž je polyester lépe zpracovatelný. Uplatňují se jako zalévací hmoty, při výrobě litých podlah, obkladaček, syntetického kamene z minerálních drtí, lepidla, tmely a při vyztužení skelnými vlákny jako vlnité střešní krytiny, či jiné aplikaci ve stavebnictví. [2], [3]

- HAVELPOL 5

Polyesterová pryskyřice na bázi kyseliny orthoftalové čiré až nažloutlé barvy se dá doplnit aditivami – až 5 % pigmentové pasty a aditiva upravující vlastnosti typu nižší hořlavost či odolnost vysokým teplotám. Vyznačuje se výbornými mechanickými a elektrickými vlastnostmi a rázovou houževnatostí. Vytvrzovací reakce je podporována přidavkem katalyzátoru a akcelérátoru, které nemohou být nikdy smíchány dohromady, aby nedošlo k exotermické reakci. Nejčastěji se používá akcelérátor Accelerator E a katalyzátory Catalyst 0, Butanox M50 a při použití v potravinářském průmyslu Catalyst O. Její využití je v oblasti lodí, pozemní dopravy a průmyslu. [4]

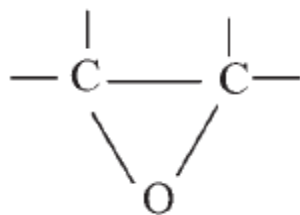
- H 834

Tato pryskyřice se vyznačuje dobrými fyzikálními vlastnostmi a nízkou smrštitivostí. Používá se pro ruční laminaci nebo stříkání. Dobře sytí rohože i tkaniny a má nespočet výhod jako jsou rychlé laminační vytvrzení, hydrolytická stabilita a snižuje vznik puchýřků. Při použití by měla mít teplotu 18 – 32 °C při vlhkosti 40 – 90 %. [5]

## 2.2.2 Epoxidové pryskyřice

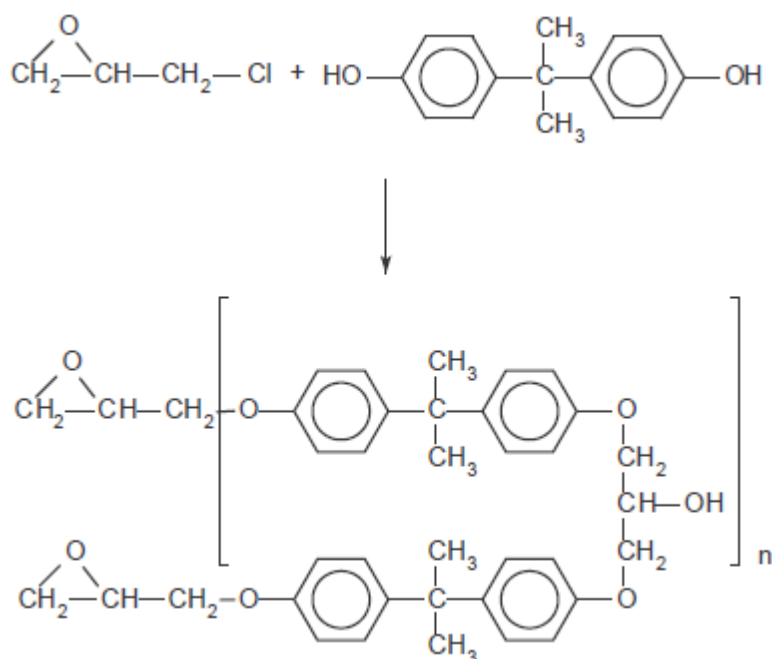
Epoxidové pryskyřice se odlišují například svou barvou – čiré, žlutohnědé až hnědé kapaliny, které se liší i svou viskozitou. Jejich molekula obsahuje alespoň dvě oxiranové skupiny (viz Obrázek 3). Pro své dobré mechanické a elektroizolační vlastnosti se používají v elektrotechnice jako izolační a zalévací hmoty, dále jako pojiva pro vysokosušinné dvousložkové nátěrové hmoty, vypalovací laky, licí podlahoviny, adheziva pro lepení kovů, keramiky a skla a dále se využívají její výborné vlastnosti jako je pevnost a tepelná odolnost při použití jako matrice pro kompozitní materiály. Hlavními výhodami jejich použití jsou nízká smrštitelnost, kontrola lomové houževnatosti a tepelná stabilita, naopak nevýhodou je vyšší cena například oproti polyesterovým pryskyřicím, citlivost k vlhkosti a nižší odolnost vůči některým organickým látkám. Vzhledem k tomu, že je jich několik druhů, které se označují Epoxy + označující číslo, zaměřím se především na tu využívanou pro letecký průmysl. Během posledních let se čísla těchto pryskyřic měnila, ale jednalo se spíše o byrokratickou formalitu. [6], [7], [8]





Obrázek 3 Epoxidová skupina [3]

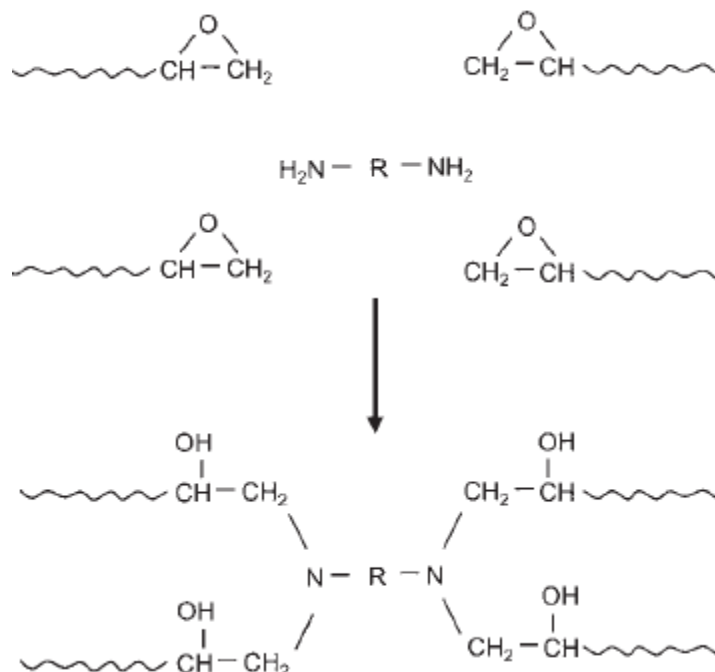
Připravují se alkalicou kondenzací epichlorhydrinu s bisfenoly (viz Obrázek 4), kdy nejčastější je Bisfenol A, zvaný taktéž dian. Probíhají zde současně dvě následné reakce. Při té první se aduje epichlorhydrin na fenolický hydroxyl a vzniká dichlorhydrinether a při té druhé se odštěpí chlorovodík a vzniknou epoxidové skupiny. Podle způsobu přípravy lze vyrobit buď vysokomolekulární, nebo nízkomolekulární pryskyřici. Vysokomolekulární se připravují především dlouhým řetězců nízkomolekulárních pryskyřic pomocí dalšího bisfenolu. Nízkomolekulární vzniká při dostatečném přebytku epichlorhydrinu, přičemž vzniká diandiglycidylether označovaný jako BADGE. [7]



Obrázek 4 Syntéza epichlorhydrinu s Bisfenolem A [9]

Vytvrzování sesít'ováním probíhá po přidavku anhydridu dikarboxylových kyselin, nebo polyaminu (viz Obrázek 5). Nejčastěji používaným je například diethylentriamin (DETA), triethylentriamin (TETA) nebo isophorondiamin (IPDA), jejich, i další množství tvrdidel, se

vypočítá pomocí vodíkového ekvivalentu polyaminu a epoxidového ekvivalentu pryskyřice. Proces je založen na polyadičních reakcích koncových epoxidových skupin i iontové polymeraci. [7]



Obrázek 5 Síťování epoxidové pryskyřice pomocí aminu [3]

Dalším způsobem vytvrzování je pomocí anhydridů dikarboxylových kyselin. Nejprve dochází k otevření anhydridového kruhu reakcí s hydroxylovou skupinou pryskyřice a poté reagují vzniklé karboxylové skupiny s epoxidovou skupinou za vzniku esterových vazeb. [7]

- Epoxid - L 285

Tato pryskyřice je určena k laminování motorových letadel a kluzáků, člunů a stavbu lodí, leteckých modelů i sportovního nářadí. Byla schválena v roce 1985 německým federálním úřadem pro letectví a kombinuje se s tužidly 285, 286 a 287 (vlastnosti těchto tužidel viz Tabulka 1, 2 a 3). Další informace o této pryskyřici jsou v experimentální části. [10]

Tabulka 1 Podrobnosti pro zpracování [10]

	Pryskyřice L 285	Tužidlo 285	Tužidlo 286	Tužidlo 287
Průměrný EP – index [počet epoxidových ekvivalentů v 1 g pryskyřice]	0,62	-	-	-
Průměrné aminové číslo [mg KOH/g]	-	64	64	64

- Tužidla

Tabulka 2 Vlastnosti vybraných tužidel 285, 286, 287 [10]

	Tužidlo 285	Tužidlo 286	Tužidlo 287
Hustota (25 °C) [g/cm <sup>3</sup> ]	0,94 – 0,97	0,94 – 0,97	0,93 – 0,96
Viskozita (25 °C) [mPas]	50 – 100	60 - 100	80 - 100
Aminové číslo [mg KOH /g]	480 – 550	450 – 500	450 – 500
Barva	max 3 (*)	max 3 (*)	max 3 (*)

\* Vztahuje se pouze k průsvitnému tužidlu - tužidla mají průsvitně modrou barvu

Tabulka 3 Míchací poměry pryskyřice a tužidel [10]

	Pryskyřice Epoxid - L 285: Tužidlo 285, 286, 287
Složky váhově	100 : 40 (+/- 2)
Složky objemově	100 : 40 (+/- 2)

### 2.2.3 Gelcoat

Složka, která zajišťuje vysoký lesk povrchu výrobku a slouží také jako ochrana laminátu, nejčastěji proti vodě. Gelcoaty jsou buď na bázi epoxidových, nebo polyesterových prykyřic. Aplikuje se přímo do formy sprejem, nebo se nanese pomocí štětečku. Tloušťka této vrstvy by se měla pohybovat v rozmezí 0,4 – 0,5 mm. Vytvrzení poté proběhne za 1 až 2 hodiny. Gelcoat může být transparentní, nebo obsahovat pigmenty, ovšem při použití gelcoatu s pigmenty je třeba brát na vědomí, že tak jako u nátěrových hmot i tady mají omezenou životnost, jelikož na

ně působí UV záření a vzdušná vlhkost. Jsou na ně kladeny odlišné požadavky při aplikaci, například ve stavebnictví se požaduje vysoká trvanlivost a nízká hořlavost případně samozhášivost. Ohnivzdorné produkty sice k dispozici jsou, ale nejsou tak odolné na povětrnosti, jako ty neohnivzdorné. Obecně se udává životnost gelcoatů u obkladů budov více než 25 let a u námořnických aplikací více než 35 let. [10], [11], [12]

## 2.3 Separátory forem

### 2.3.1 Vosky

- Separáční základov  vosk

Jedná se o voskov  žlutobílou krémovitou tekutinu, kter  se pouŹiv  jako podkladov  vrstva pro separátor PVA (polyvinylalkohol) při laminaci do forem. D leŹit  je, aby forma a vosk měli pokojovou teplotu 20 – 25  C. Vosk se do formy aplikuje m kk m had ikem, aby se vrstva nepoŹkr bala. Po zaschnutí se vosk rozleŹt . Při separaci z formy lze výrobek očistit od zbytků vosku technick m benzínem. [13]

- TR 104

Vyroben  z rafinovaného karnaubsk ho vosku sm iŹen ho se syntetickými plnivý zlepŹuj c  tepeln  vlastnosti. Doporučuje se pro aplikaci do forem s tvrd m povrchem - epoxidov , polyesterov  a kovov . Vyznačuje se bled  modrou barvou a teplotou měknutí 88 – 98  C, proto lze aplikovat do forem, jejichŹ zah at  nepřesáhne teplotu 90  C. [14]

- Oskar's M700

NaŹloutl  aŹ hn d  tuh  voskovit  látka z karnaubsk ho vosku s p im Ź  benz nov  frakce, vody a emulgátoru. Téměř bez zápachu. Je  aste n  rozpustn  v uhlovodících a nerozpustn  ve vodě. Vytv r  velmi odolnou, tvrdou a lesklou vrstvu. M  označení „Zdrav  Źkodliv “. [15]

### 2.3.2 PVA – ECO

Jedná se o roztok polyvinylalkoholu rozpuŹt n ho ve vodno-alkoholick m prostředí. Vyznačuje se  irou aŹ modrou transparentn  barvou a alkoholick m zápachem. PouŹiv  se na separaci kompozitních (polyesterových, epoxidových, polyamidových a vinylesterových

pryskyřic) a kovových forem v mnohých případech v kombinaci s použitím vosku, přičemž se nanese až na aplikovaný vosk. [16]

## 2.4 Vlákná

Vlákná lze považovat za výztuž, tedy pevnou část kompozitu. Ta mohou být z různých materiálů jako je sklo, uhlík či aramid. Rozdělují se na uni-směrná, obousměrná a vláknitá rohože, které představují nasekané provazce vláken. Podle těchto orientací je lze použít pro různé účely. Skelná a uhlíková vlákna mají velké využití v leteckém průmyslu, při výrobě člunů, vířivek či bazénů. [11]

### 2.4.1 Uspořádání vláken – suchá forma

- Příze

Je tvořena vlákny, která jsou zakroucena a podle směru kroucení se rozdělují na tzv. S-typ a Z- typ. To, aby si vlákna udržovala svoje umístění, zajišťuje způsob kroucení, tedy jedna otáčka na 1 cm, tím lze i lépe udržet napětí při procesech navíjení a tkaní. Obvykle jsou menší než roving. [8]

- Roving

Nekonečně dlouhá vlákna, která nejsou nijak zakroucena, ale jedná se o pramenec (viz Obrázek 6). Většinou se jedná o vlákna skelná a uhlíková, ta se v pramenci mohou nacházet v počtu 1000 až 48 000 jednotlivých filamentů. [8]



Obrázek 6 Uhlíkový roving [17]

- Netkaná textilie

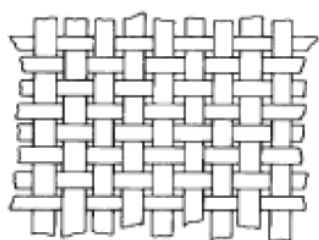
Délka vláken v netkané textili se pohybuje do 50 mm, jednotlivá vlákna jsou spojena polymerní matricí (viz Obrázek 7) a při výrobě se stříkají na pohyblivý pás, poté vznikne rohož. [8]



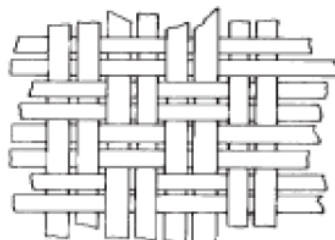
*Obrázek 7 Netkaná textilie [8]*

- Tkaná textilie

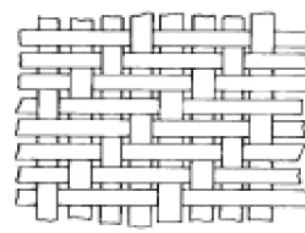
Tyto textilie jsou spřádány z běžných vláken a liší se právě stylem jakým jsou spřádány. To má vliv na výsledné vlastnosti. Základními druhy jsou plátno, kepr, košík a atlas (viz Obrázek 8). Nejběžnějším je typ plátno (1 x 1), kdy je zajištěna vcelku dobrá stabilita tkaniny. Košík je typ, který se podobá plátnu, ale v tomto případě dvě vlákna překříží další dvě vlákna. Kepr (2 x 2 nebo 4 x 4) a atlas (tzv. 5 - postroj nebo 8 -postroj) mají nižší stupeň zvlnění než plátno, lepší tvářitelnost a splývavost. Také jsou méně stabilní a může se s nimi hůře manipulovat. Tyto tkaniny je možno mít i ve formě, kdy se nejedná jen o vlákna jednoho druhu, ale například jde kombinovat vlákna skleněná, uhlíková, aramidová. V takovém případě se jedná o tzv. hybridní (smíšená) vlákna, která slouží za účelem dosažení určitých vlastností, nebo při snižování ceny produktu. [8]



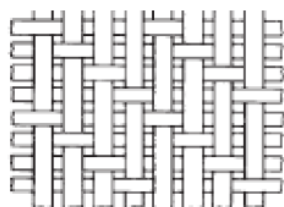
Plátňová vazba



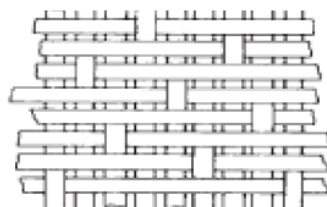
Košíková vazba



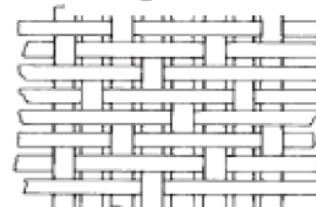
Keprová vazba



Crowfootův atlas



8 vazný atlas



5 vazný atlas

Obrázek 8 Druhy tkaných textilií: plátňo, košík, kepr, atlas [18]

- Úplety

Vyrábí se ve dvou formách, a to buď trubicové nebo plátňové. V porovnání s tkanými textiliemi jsou dražší a dostupné jsou užší šíře, kvůli omezené velikosti pletacího stroje. Právě výrobní proces dělá tato vlákna drahými. Jsou vhodné na výrobu komponentů s malými průřezy, tedy tyče a trubky. [8]

- Pásky

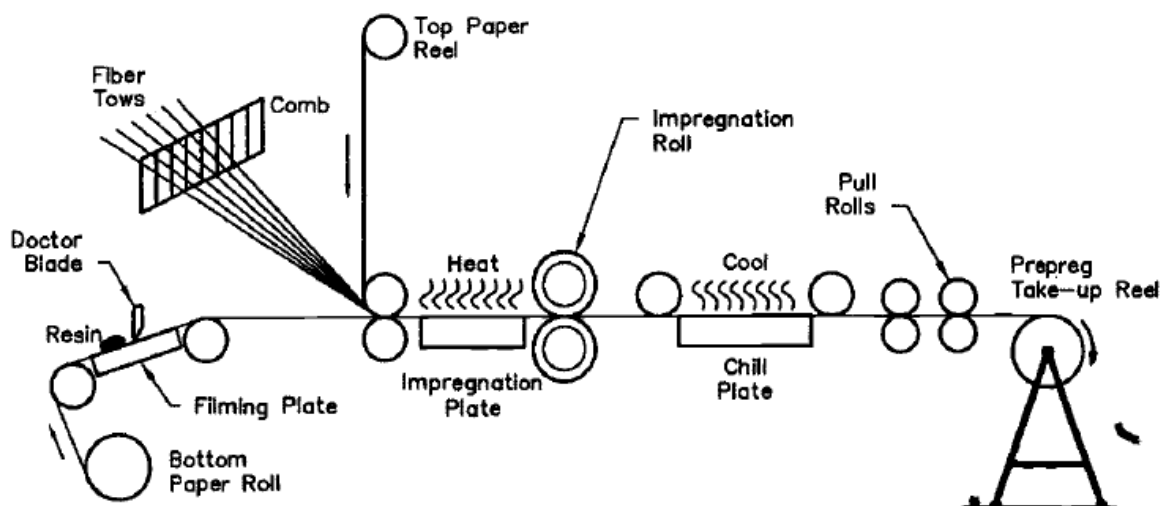
Jsou podobné jako roving, tedy jedná se také o jednosměrná vlákna, ale jsou prošita kolmo nití, aby držela svůj tvar (viz Obrázek 9). Na okrajích je také obšita nití a po vytvrzení kompozitu se tato část odřízne. Druhým typem spojení vláken je pomocí nevytvrzeného reaktoplastu, nebo nízko-objemové frakce termoplastického polymeru, což je nazýváno jako prepreg. Pásky nepřekročí šířku 100 mm. [3], [8]



Obrázek 9 Uhlíková páska [19]

- Prepregy

Pojem prepreg označuje tkaninu napuštěnou pryskyřicí, která se aktivuje teplotou v místnosti, při níž se také vytvrzuje. Výhodou je rovnoměrné prosycení tkaniny, naopak nevýhodou je jejich skladování. Jelikož se pryskyřice aktivuje při teplotě okolo 20 °C je třeba skladovat naimpregnované tkaniny při teplotě okolo -20 °C. Samozřejmě se tohoto typu tkanin dá využít nejen pro ruční kladení, ale také například pro vakuování, či použití autoklávu. Výroba prepregů viz Obrázek 10. [11]



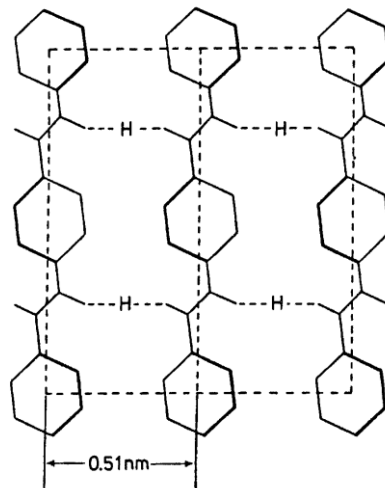
Obrázek 10 Ilustrace výroby prepregů [8]



## 2.5 Druhy vláken

### 2.5.1 Aramidová vlákna

Tento typ byl představen v roce 1961 firmou DuPont. Aramidová vlákna jsou organická vlákna, jejichž součástí je aromatický polyamid (viz Obrázek 11). Můžeme rozlišovat polymery na základě jejich orientace, a to buď meta-, nebo para-. Meta - orientovaná vlákna (např. Nomex) jsou více teplotně odolná a para-orientovaná vlákna jsou pevnější. Nomex je velmi lehké, pevné, tepelně odolné vlákno, vydrží teplotu i 370 °C. Pro tyto vlastnosti má velké využití – od neprůstředných vest, přilby až po letecký průmysl (viz Tabulka 4). Neocenitelnou vlastností nomexové tkaniny je, že při hoření vydává malý kouř. [11], [20], [21]



Obrázek 11 Polymerní struktura aramidových vláken [8]

- Kevlarová vlákna

Mezi p-aramidová vlákna patří známý Kevlar, což je obchodní označení pro poly(p-fenyltereftalamid (PPD-T). Toto vlákno vzniklo v 70. letech 20. století, kdy ho na trh uvedla firma DuPont. Existují 3 hlavní kevlarová vlákna, a to: Kevlar, Kevlar 29 a Kevlar 49, které se liší svými vlastnostmi, mezi ty hlavní patří extrémní pevnost a odolnost (viz Tabulka 4). Využití bylo nalezeno v neprůstředných vestách, přilbách, a dokonce i v leteckém průmyslu – ochrana proudových motorů, či stupačky v záchranném systému letadel typu Cirrus SR20 a Cirrus SR22 (Cirrus Airframe Parachute System – CAPS). [11], [22]

Tabulka 4 Vlastnosti vybraných aramidových vláken v závislosti na teplotě [23]

Názvy vláken	Nomex	Kevlar 29	Kevlar 49
Teplota	Pevnost v tahu (GPa)		
150 °C	0,46	2,5	2,7
200 °C	0,39	2,2	2,6
250 °C	0,32	2,0	2,4

### 2.5.2 Borová vlákna

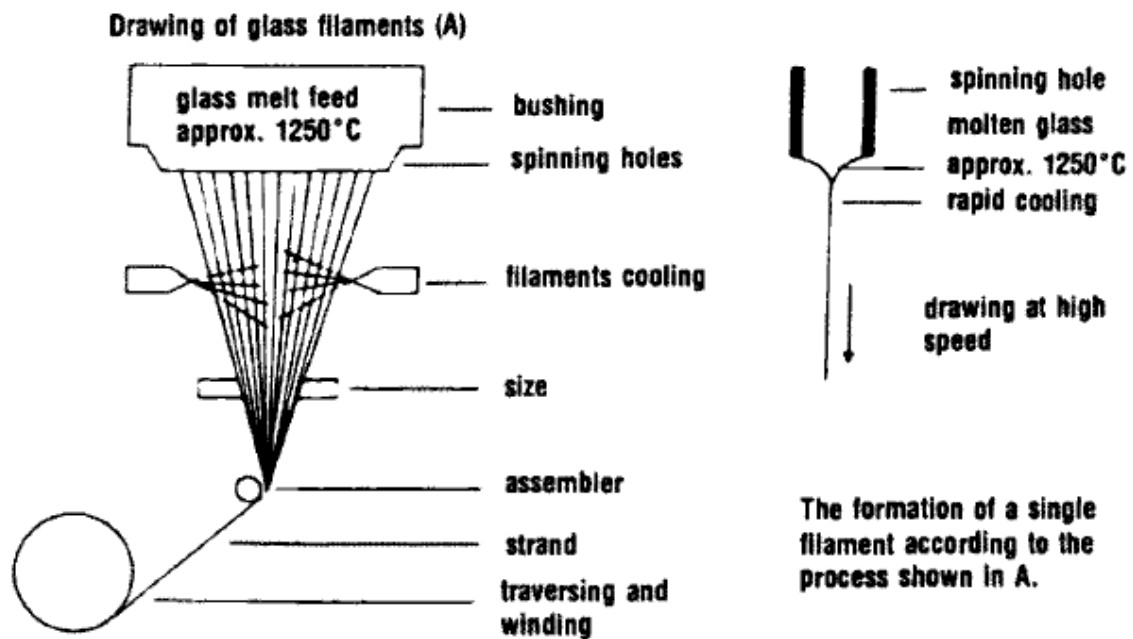
Velmi sofistikovaná vlákna s využitím převážně v leteckém průmyslu pro svou lehkost a pevnost s průměrem 125 – 140  $\mu\text{m}$ . V porovnání s uhlíkovými vlákny jsou mnohem dražší, a protože je bor téměř tak tvrdý jako diamant, je i hůře opracovatelný. Je pro ně typická neelastická deformace při prodloužení při zvýšené teplotě. Pro vylepšení vlastností, především snášenlivosti s titanovými a hliníkovými matricemi, se vlákna začala potahovat karbidy křemíku, která nesou označení „Borsic“. Jsou součástí stíhaček F-14, F15 a B-1 Lancer. Dalším využitím jsou rámy jízdních kol, rybářské pruty či golfové hole. Byla to první vlákna používána k vyztužení kovů. [8], [11]

### 2.5.3 Skleněná vlákna

Sklo je amorfní pevná látka na bázi oxidu křemičitého ( $\text{SiO}_2$ ) s příměsí dalších oxidů (hliníku, sodíku, boru, hořčíku, draslíku atd.), pro vylepšení vlastností např. snížení teploty tání  $\text{SiO}_2$ . Ovšem i zde dochází k vadám materiálu a ty mohou být buď formou submikroskopických inkluzí nebo prasklin. Praskliny, na rozdíl od inkluzí, které jsou vidět pod elektronovým mikroskopem, nelze tak snadno odhalit, jelikož jejich velikost se pohybuje v řádech nanometrů. Komerční skelná vlákna ztrácí svou pevnost v tahu při tření s jinými vlákny až o 20 %. Jsou používána pro svou nízkou cenu a vysokou pevnost v leteckém průmyslu a díky svým dielektrickým vlastnostem je aplikováno při výrobě anténních kopulí. V takovýchto konstrukčně náročných aplikacích jsou používány od počátku 60. let 20. století. Lze je rozdělit do dvou skupin na tzv. nízkonákladová obecně užívaná a na prémiová speciální.

Velmi využívané v letectví jsou skleněné výtzuže – pramence (roving), tkaniny a rohože, které se vyrábějí z nízkoalkalické skloviny. Skleněné rovingy jsou složeny z vláken o průměru 0,009 až 0,013 mm. [6], [8], [24]

Jejich výroba probíhá v peci, kdy je roztaveno sklo při teplotě asi 1400 °C, které proudí elektricky vyhřívaným pouzdrům ze slitiny platiny a rhodia, nebo zvlákňovacími tryskami, kde se nachází 4000 – 8000 otvorů. Vzniklé kapky proudí rychlostí až 50 m.s<sup>-1</sup> a následně jsou ochlazeny vodní mlhou. Nakonec se vlákna spojí do řetězce a jsou namotávána na cívku (viz Obrázek 12). [8]



Obrázek 12 Schématické znázornění procesu výroby skelných vláken [8]

- Lodní vlákna

Speciální označení pro skelná vlákna využívaná pro stavbu lodí. Jedná se o krátká nasekaná vlákna stlačená dohromady tzv. skelnou rohož. Pro nasycení této rohože je vyžadováno 1,5 až 2krát takové množství pryskyřice, než-li je hmotnost rohože. [11]

- C-sklo

Toto označení značí hlavní vlastnost tohoto vlákna a to „corrosion-resistant fiber“, což znamená v překladu, že sklo odolává korozi, tedy působení kyseliny sírové a chlorovodíkové. Lze se setkat i s označením „chemicky odolné“. [11], [24]

- E-sklo

Také u E-skla (vápenato-hlinito-borosilikátové sklo) plyne jeho označení z hlavní vlastnosti a tou je zde elektrický odpor a řadí se do skupiny obecně užívaných. Patří mezi nejpobulárnější skelná vlákna, jeho použití činí až 90 %. Má dobré pevnostní vlastnosti a není tak nákladné. Je

součástí anténních kopulí letadel a součástí plošných spojů v počítačích. Až z 50 % je tvořeno oxidem křemičitým, dále 5 – 6 hmot. % oxidy boru, hliníku a příměsí dalších sloučenin, kvůli ekologickým předpisům je třeba snižovat bor z odpadních plynů, proto jsou k dispozici i E-skla bez boru. [8], [11], [24]

- R-sklo (S-sklo pro USA nebo T-sklo pro Japonsko)

Bylo vyvinuto v roce 1960 za vojenskými účely. Oproti E-sklu má větší pevnost a je více odolné teplotám, to je způsobeno větším množstvím oxidu křemičitého, hlinitého a obsahem oxidu hořečnatého, proto je řazeno do skupiny vláken speciálních. Jedná se o hořčík hlinito-křemičité sklo. Využití nachází v leteckém průmyslu také pro svou nízkou hmotnost. [8], [11], [24]

- S-2 sklo

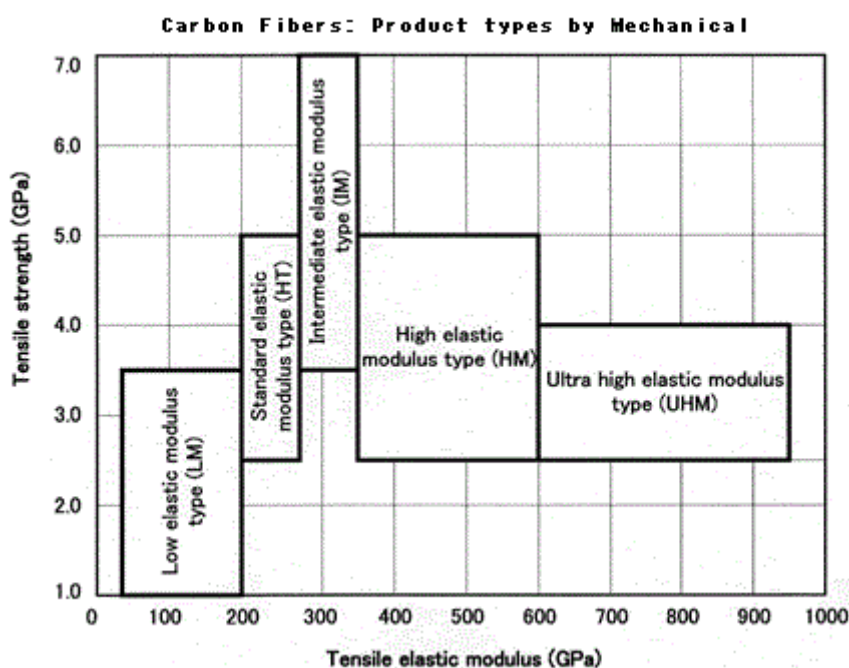
Je přibližně o 40 – 70 % pevnější než E-sklo. Ve srovnání má větší pevnost v tlaku a tahu, vysokou odolnost a houževnatost. Současně vykazuje vlastnosti jako C-sklo, tedy dobrou odolnost proti korozi – kyselině sírové a chlorovodíkové. V leteckém průmyslu se aplikuje do interiéru, lopatky vrtulí a podlahy, jeho využití je i mimo letectví. [11]

#### 2.5.4 Uhlíková vlákna

Jak už z názvu vypovídá jedná se o vlákna s minimálním podílem 92 % uhlíku, jak bylo definováno Mezinárodní unií pro čistotu a aplikovanou chemii (IUPAC) a tloušťkou 5-10  $\mu\text{m}$ . Na trhu jsou od počátku 60. let 20. století. Vyznačují se specifickými vlastnostmi (viz Tabuka 5), a to vysokou mechanickou pevností, lehkostí, chemickou odolností, vysokou tepelnou odolností, houževnatostí a nízkou tepelnou roztažností (viz Obrázek 13). Právě pro tyto velmi dobré vlastnosti mají velké využití v leteckém průmyslu, materiálovém inženýrství a nyní se už dostávají více i do oblasti sportovních potřeb či motoristického průmyslu. [25]

Tabulka 5 Rozdělení uhlíkových vláken dle mechanických vlastností [26]

Typ vlákna	Modul pružnosti v tahu (GPa)	Pevnost v tahu (MPa)
Ultra vysoce elastický modul (UHM)	600 nebo vyšší	2500 nebo vyšší
Vysoce elastický typ modul (HM)	350 až 600	2500 nebo vyšší
Středně elastický modul (IM)	280 až 350	3500 nebo vyšší
Standardní elastický modul (HT)	200 až 280	cca 2500 nebo vyšší
Nízko elastický modul (LM)	200 a méně	3500 a méně



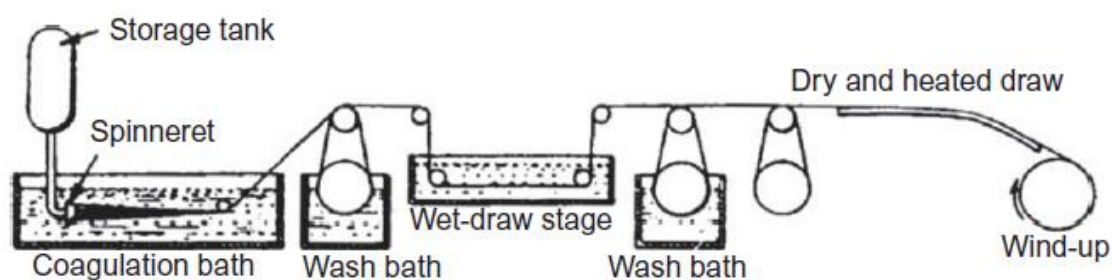
Obrázek 13 Závislost mechanické pevnosti na elastického modulu pružnosti [26]

Uhlíková vlákna jsou vyráběna čtyřmi následnými postupy ze syrových uhlíkatých nebo syntetických vláken na bázi umělého hedvábí, polyakrylonitrilu (PAN), fenolických pryskyřic nebo z ropných produktů. [25]

## Prekurzory

- PAN

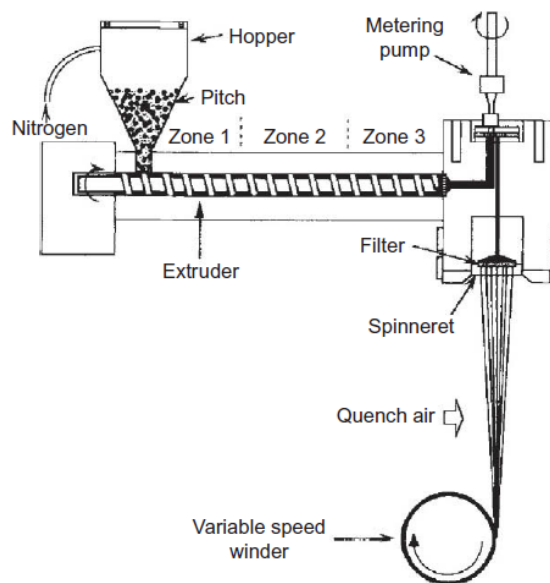
Polyakrylonitril je ataktický polymer vhodný pro všechny typy zvlákňování, ale nejčastěji se v praxi vyrábí mokrým zvlákňováním (viz Obrázek 14), kdy se roztok skládá z 10 – 30 hm. % PAN, který je rozpuštěn v polárním rozpouštědle, většinou v thiokyanátu sodném, dimethylacetamidu, nebo kyselině dusičné. Suchým zvlákňováním vznikají vlákna, která jsou hladší oproti mokrému. Nejprve je PAN stabilizován při teplotě 250 °C, kdy dochází k vytvoření stabilní struktury, která zvyšuje teplotu skelného přechodu. Na PAN se můžou navázat například dusík nebo kyslík, a tak následuje další krok a tím je karbonizace v inertní atmosféře dusíku při teplotě 1200 – 1600 °C. Pro dosažení vyššího modulu se provádí tzv. grafitizace (až do 2500 °C). Aby nedošlo ke vzniku trhlin, provádí se v inertní atmosféře argonu. Youngův modul se tak zvýší až na 380 GPa. Obecně se PAN vyznačuje dobrými tahovými a tlakovými vlastnostmi a teplotou skelného přechodu okolo 120 °C. [8], [25]



Obrázek 14 Mokrý zvlákňování pro tvorbu akrylových vláken [25]

- Smola

Tento prekurzor je studován od 60. až 70. let 20. století a jedná se o kapalnou krystalickou látku složenou z polycyklických aromatických uhlovodíků. Vyznačuje se dobrou tepelnou stabilitou mezifáze, a proto se vyrábí tavným zvlákňováním (viz Obrázek 15). Nejdříve se syrová smola polymerizuje a kondenzuje, a tak se dostává z formy izotropní do anizotropní. Na konci procesu se vlákna stabilizují při teplotě 230 – 280 °C a poté se karbonizují při teplotě 1500 – 3000 °C. Velice záleží na výběru surové smoly, jelikož tím jsou ovlivněny výsledné vlastnosti vláken. [25]



Obrázek 15 Zvlákňování z taveniny používané pro výrobu mezofázových uhlíkových vláken [25]

- Lignin

Lignin je přírodní fenolický polymer, druhý nejrozšířenější v přírodě, hned po celulóze, který se používá k produkci fenolických polymerů a jako náhradní surový materiál pro výrobu fenolických pryskyřic, lepidel a jiných chemikálií. Procesy pro výrobu vláken jsou zvlákňování z taveniny a suché zvlákňování. [25]

- Umělé hedvábi

Jedná se o semi-syntetická vlákna, jelikož jsou vyrobeny z přírodních polymerů a patřila mezi první pevná uhlíková vlákna. Dnes se ovšem produkuje asi 1 % vláken z tohoto prekurzoru, což je dáno malými výtěžky, horšími vlastnostmi polotovaru a vysokými náklady. Proces výroby je mokřým zvlákňováním, kdy z trysek proudí xantogenát celulózy rozpuštěný v hydroxidu sodném do koagulační lázně obsahující 10 – 15 % kyseliny sírové. Po vysrážení vláken se oxidují horkým proudem vzduchu pro zlepšení jejich vlastností. [25]

### 2.5.5 Grafitová vlákna

Dalo by se říct, že grafitová vlákna jsou to samé, co uhlíková, ale liší se v obsahu uhlíku, kdy grafitová vlákna musí mít minimální obsah 99 %, a uspořádáním atomů - v tomto případě se jedná o trojrozměrné uspořádání. To se samozřejmě podepíše i na jejich výsledných

vlastnostech – vyšším modulu pružnosti (vyšší než 345 GPa), což je způsobeno silnou kovalentní vazbou. [3]

### 2.5.6 Korek

Použití korku v kompozitech se rozmohlo do oblastí leteckého a automobilového průmyslu, dále v oblasti větrných elektráren či sportovního vybavení. Má velmi specifické vlastnosti, a proto se používá do kompozitů a sendvičů, ty se využívají pro aplikace, kde je třeba snížit hluk, hmotnost či zvýšit tepelnou izolaci. Proto se s nimi lze setkat u běžnějších aplikací jako jsou dveře, okna, střechy a zdivo. Více o korku v experimentální části. [27]

## 2.6 Zvlákňování

Prvním krokem výroby je takzvaný spinning nebo též zvlákňování, kdy se z granulátu, nebo prášku prekurzoru vytvoří kontinuální vlákno. Jsou prováděny 3 způsoby zvlákňování – suché, mokré a z taveniny.

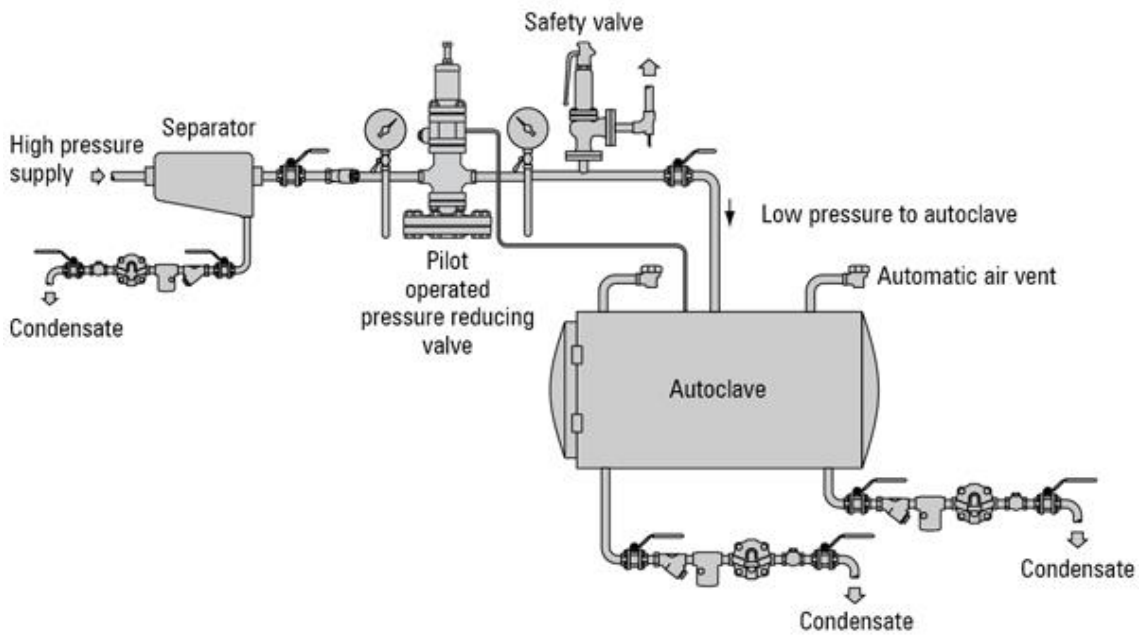
Suché zvlákňování se provádí sice z roztoku prekurzoru, ale suché se nazývá proto, že při proudění ze zásobní nádoby na ně proudí suchý vzduch, který způsobí odpaření rozpouštědla a vznik vlákna. Mokré zvlákňování se provádí tak, že se zvlákňovací tryska s prekurzorem zavede do koagulační lázně a po styku s ní se vysráží vlákno. Zvlákňování z taveniny má tři stupně: Nejdříve se roztaví prekurzor, následně se vytlačuje zvlákňovací tryskou, v které je velké množství kapilár a po tomto procesu dojde k vytvoření vláken. [25]

## 2.7 Technologie laminování

### 2.7.1 Autokláv

Zařízení, které se používá pro vytvrzování především velkých kompozitových dílů tvořených prepregy. Funguje na základě zvýšených teplot a tlaku, což způsobí velmi dobrou soudržnost jednotlivých vrstev (viz Obrázek 16). Před tím, než se výrobek umístí do autoklávu, se na něj aplikuje pružná fólie. Poté už je výrobek umístěn do autoklávu, kde se nejdříve evakuuje pod tlakem cca 0,8 bar a teprve poté dojde k přetlaku cca 6 bar. [28], [29]





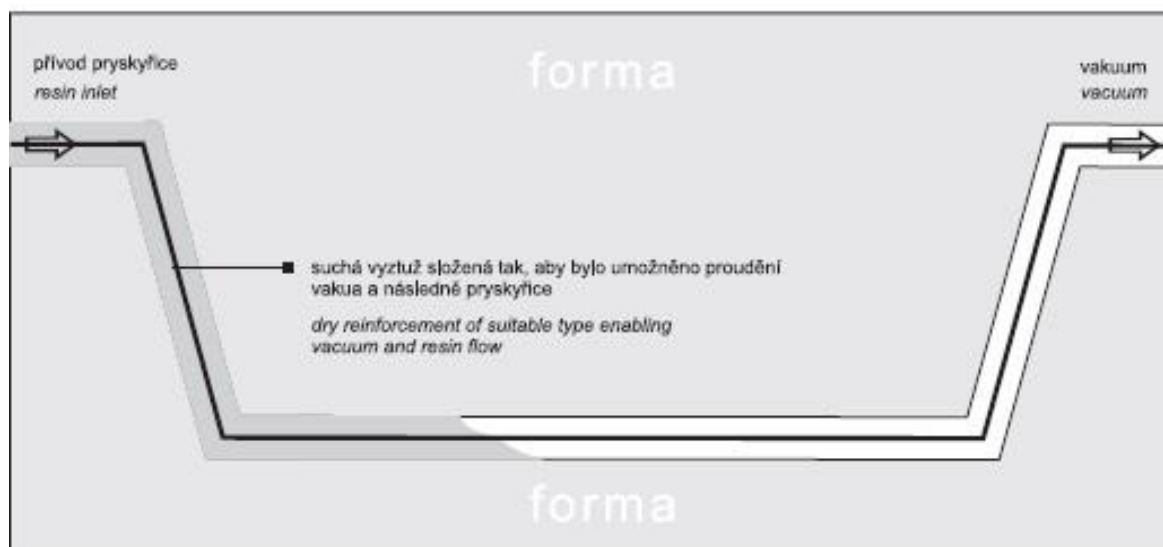
Obrázek 16 Autokláv [30]

### 2.7.2 Vakuování

Proces, díky kterému je pryskyřice rozprostřena rovnoměrně celým povrchem dané části výrobku, bez přebytečné pryskyřice, což znamená šetření váhy daného komponentu. Jsou dva způsoby, jak lze této metody využít. V prvním případě (viz Obrázek 17) lze do separované formy aplikovat daný počet vrstev tkaniny za sucha, na ně položit vrstvu, která zabrání slepení fólie pro vakuování, dále umístit plastovou síť na lepší rozvod pryskyřice, připojit hadičky na jedné straně formy pro vstup pryskyřice, kde je umístěna i speciální hadička, ve tvaru spirály, v délce celé formy, která způsobí rovnoměrné rozvedení pryskyřice v délce formy, a na druhé straně hadička na odvod pryskyřice, potažmo na odsátí vzduchu, což je potřeba udělat jako první. Když je vzduch z formy odsán pomocí vývěvy, při tomto procesu je hadička na druhé straně formy ucpána, tak se na vstup druhé hadičky umístí pryskyřice, která je díky podtlaku ve formě rozvedena. Přebytečná pryskyřice je odvedena hadičkou do kelímku.

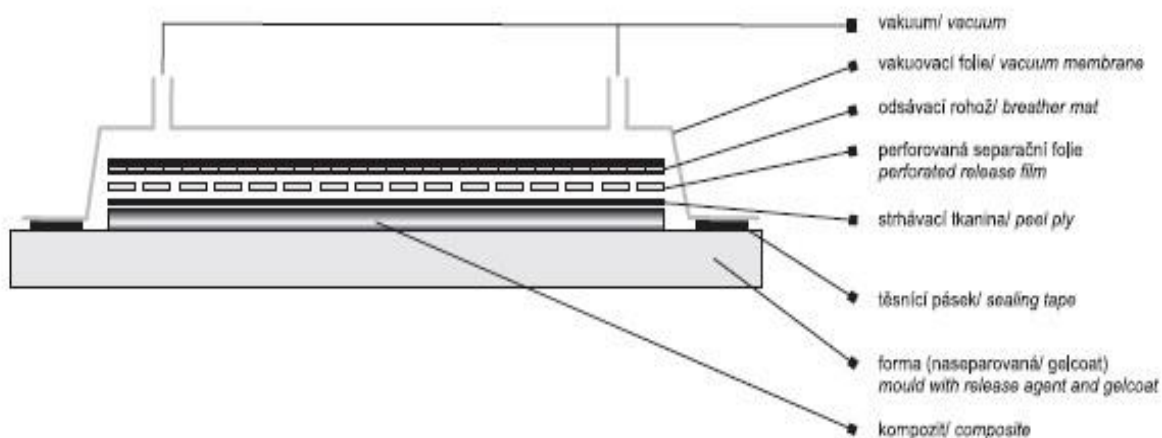
Druhý způsob (viz Obrázek 18) se liší v tom, že vrstvy kladené do formy se prosytí ve formě a položí se na ně speciální ubrousky, které způsobí odsátí přebytečné pryskyřice, a fólie pro vakuování s jedním vývodem do vývěvy, díky které se odsaje přebytečný vzduch. Samozřejmě v obou případech je po celé délce formy přilepena oboustranná páska, která zabraňuje úniku vzduchu. [31], [32]

## Vakuové prosycování/ vacuum infusion



Obrázek 17 Vakuové prosycování [29]

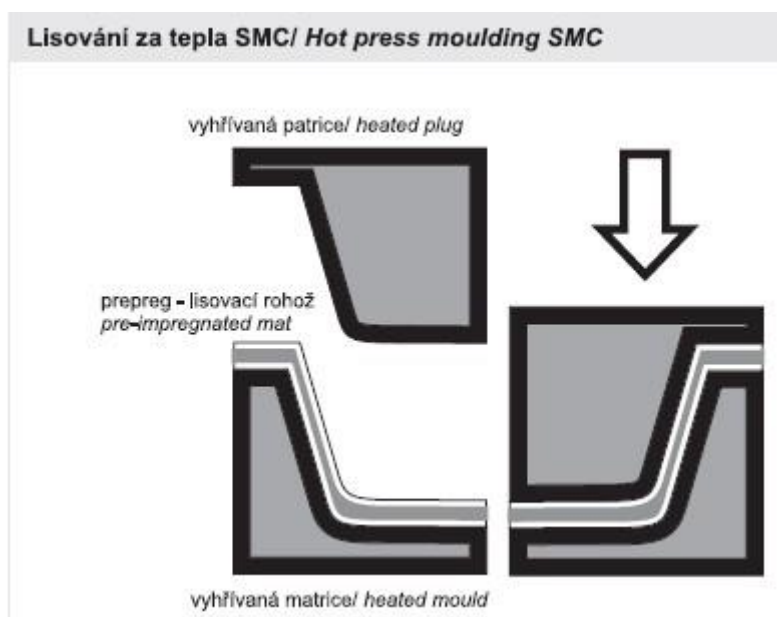
## Lisování pomocí vakua/ vacuum bagging



Obrázek 18 Lisování pomocí vakuování [29]

### 2.7.3 Lisování

K lisování je zapotřebí většinou ocelové formy rozdělené na dvě části (případně více, dle členitosti výrobku), tvořící dutinu, které mohou být i zahřívány elektricky, horkým olejem v potrubí, nebo párou (viz Obrázek 19). Nevýhodou jsou vysoké náklady, naopak výhodou jsou kvalitní povrchová úprava a vysoká produktivita. [8]



#### 2.7.4 Otevřená forma lití

Tento způsob laminování se uskutečňuje pomocí stříkání, nebo natírání suché tkaniny pouze do jedné poloviny formy. Problémem tohoto způsobu je bezpečnost a ochrana zdraví lidí, kteří tuto práci vykonávají, dále pak nelze kontrolovat obsah pryskyřice v materiálu, může tak dojít k nerovnoměrnému nanesení. [8]

#### 2.7.5 Kontaktní ruční laminování

Jak už z názvu vyplývá, jedná se o ruční nanášení matrice a výztuže do formy (viz Obrázek 20). Nejprve se forma separuje obvykle PVA, nebo speciálními separovacími vosky, které se nechají zaschnout a vytvoří se film. Poté se nanese gelcoat, opět se nechá zaschnout a nanese se vrstva pryskyřice, na kterou se položí výztuž (např. uhlíková tkanina), která se prosytí pryskyřicí pomocí speciálního válečku, popřípadě štětcem. Pro tento způsob jsou důležité zkušenosti člověka, který laminování provádí. Obzvláště u uhlíkových tkanin, jelikož na rozdíl od skleněných, není vidět, jak moc jsou vlákna prosycená, zvláště při laminování velkých ploch (křídla letadel, lodě...) je třeba si dát pozor, aby tkanina byla prosycena rovnoměrně a nevznikla místa, která by byla prosycena moc, nebo naopak málo. V leteckém průmyslu je to zvláště důležité, protože se zde hodně šetří váha letadla. [33]

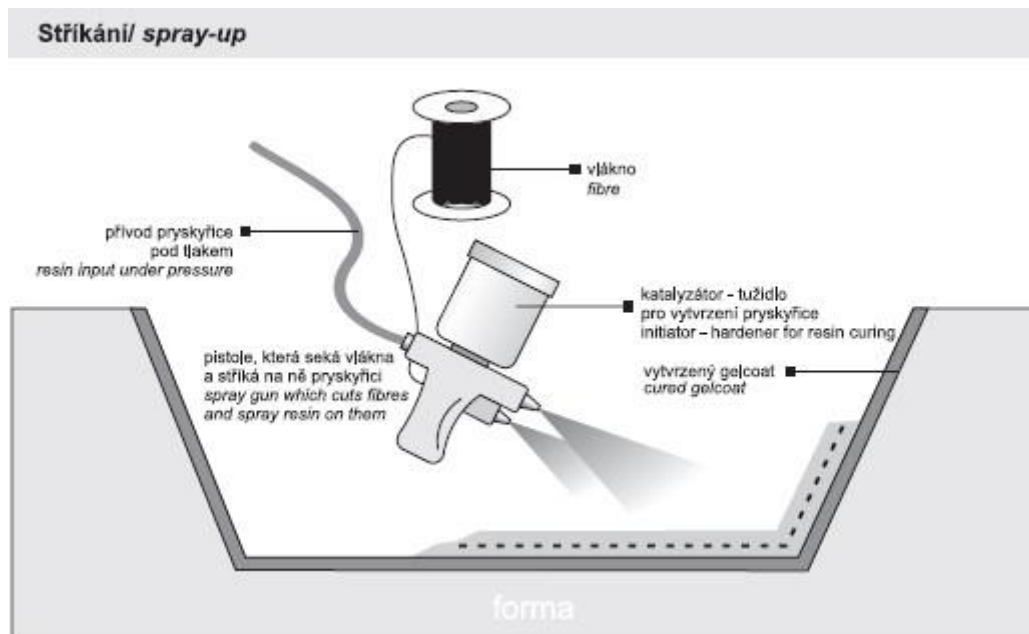
## Ruční kladení/ *hand lay-up*



Obrázek 20 Příklad kontaktního laminování [29]

## 2.7.6 Stříkání

Proces aplikovatelný například na výrobu bazénů. Speciální pistolí s nádobkou na pryskyřici smíchanou se sekanými vlákny se stříká rovnoměrně do separované formy (viz Obrázek 21). Vzhledem k tomu, že tento způsob není příliš šetrný ke zdraví člověka, je tato metoda mnohdy aplikovaná robotem, přesněji řečeno robotickým ramenem. Aby se vrstvy zhutnily, používá se štětinový, nebo rýhovaný váleček na dotlačení. [29], [34]



Obrázek 21 Proces stříkání [29]

## 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 3.1 Použité materiály

#### 3.1.1 Epoxid L 285

Tato pryskyřice vykazuje při použití s různými tvrdidly různé doby zpracovatelnosti tzv. pot life (45 minut až 5 hodin), při použití vláken (uhlíkových, kevlarových, skelných) se vyznačuje vysokými dynamickými a statickými vlastnostmi. Dalšími vlastnostmi jsou extrémně dobrá fyziologická odolnost a dobrá mechanická a tepelná odolnost (- 60 °C až + 50 - 60 °C bez temperování, a - 60 °C až + 80 - 100 °C po temperování). Při vytvrzování při pokojové teplotě jsou výrobky opracovatelné a mohou se vytáhnout z formy. Výhodou je, že lze získat nelepivý a lesknoucí povrch i při nevhodných podmínkách vytvrzování jako jsou vysoká vlhkost a nízká teplota. Dalším významným faktorem této pryskyřice je její viskozita (600 – 900 mPas při 25 °C), která způsobuje rychlé a kvalitní prosycení vláken, nikoliv však ve vertikální poloze. Pro vylepšení vlastností se k ní mohou přidat i různá plniva (kovový prášek, bavlněné vločky...). Dále hustota samotné pryskyřice je 1,18 – 1,23 g/cm<sup>3</sup> při 25 °C, ale při použití tužidel, nejčastěji 285, 286 a 287 (viz Tabulka 1, 2) se snižuje na hodnotu cca 0,95 g/cm<sup>3</sup> při 25 °C. Hodnota epoxidového ekvivalentu činí 165 – 170 a epoxidového indexu 0,59 – 0,65 (viz Tabulka 1). Výsledné vlastnosti jsou ovlivněny poměrem množství epoxidového tužidla, proto je třeba správné dodržení množství udávané výrobcem (viz Tabulka 3). Tato pryskyřice od firmy Lange + Ritter byla použita jako matrice pro přípravu všech vzorků v této bakalářské práci. [10]

#### 3.1.2 Tužidlo 285

Jako tužidlo pro vybrané kompozitní materiály bylo použito tužidlo 285 (viz Tabulka 6) od firmy Lange + Ritter.

Tabulka 6 Vlastnosti tužidla 285 [10]

	Tužidlo 285
Hustota (25 °C) [g/cm <sup>3</sup> ]	0,94 – 0,97
Viskozita (25 °C) [mPas]	50 – 100
Aminové číslo [mg KOH / g]	480 – 550
Barva	max 3

### 3.1.3 Araldit AW106 a tužidlo HV953U

Tento typ Aralditu (epoxidové lepidlo), od firmy Huntsman, ve spojení s tímto tužidlem, také od firmy Huntsman, má využití pro lepení dřeva, keramiky, kovů, vulkanizované gumy a plastů. Araldit je čirý a tužidlo do hněda, vzhledem k tomu, že jejich směšovací hmotnostní poměr je 100:80, tak výsledné lepidlo zůstává čiré. Je skladováno při teplotě 15 – 25 °C a minimální trvanlivost udávaná výrobcem činí 1 rok od koupi. Výhodou je vysoká pevnost ve stříhu a odlupování, dobrá odolnost vůči dynamickému a statickému zatížení nebo jednoduchá aplikace. Proto bylo použito na lepení plechů. [35]

### 3.1.4 Araldit 2014 (AW139 + XB5323)

Jedná se o dvoukomponentní pastovité lepidlo na bázi epoxidové pryskyřice vytvrzující se za pokojové teploty od firmy Huntsman. Lze jím lepit mnoho druhů materiálů, jeho teplotní odolnost je do 120 °C a jejich směšovací hmotnostní poměr činí 100:50. Vyznačuje se vysokou houževnatostí, vysokou stříhovou pevností ve stříhu dobrou chemickou odolností nebo dobrou odolností proti povětrnostním vlivům, proto bylo použito na lepení plechů. Více o vlastnostech viz Tabulka 7. [36]

Tabulka 7 Vlastnosti Aralditu 2014 [36]

Vlastnost	Araldit AW139	XB5323	směs
Vzhled	béžová pasta	šedá pasta	šedá pasta
Doba zpracovatelnosti (100 g při 25 °C)	-	-	cca 40 minut
Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	1,6	1,6	1,6

### 3.1.5 PVA

Polyvinylalkohol je zelená tekutina, která se aplikuje pomocí hadříku či houbičky, kdy je nanášena rovnoměrná vrstva, která se po zaschnutí (do 20 minut při pokojové teplotě) navýší opětným nanesením (2 vrstvy). Důležitým faktorem je, aby byl povrch před aplikací očištěn od mastnot, jinak by mohlo dojít k efektu zvanému očkování, což znamená, že separátor nepřilne k povrchu, a tudíž v daném místě nelze výrobek „vyloupnout“ z formy. Vytváří po zaschnutí lesklý, tuhý zelený povrch, který se po vytvrzení kompozitu ve formě může přenést na produkt, ale vzhledem k tomu, že je rozpustný ve vodě, lze ho z povrchu předmětu jednoduše omýt vodou. Určený je pro separaci polyesterových, polyamidových, vinylesterových a epoxidových pryskyřic. Je vyráběn americkou firmou Axel. [16]

### 3.1.6 Skelná páska

Byla použita jednosměrná skelná páska od firmy Interglas s označením 92 145 vyrobená ze skelné tkaniny typu E-sklo a gramáží 220 g/m<sup>2</sup> (viz Tabulka 8). Tato tkanina je certifikovaná pro letecký průmysl. [37]

Tabulka 8 Vlastnosti skelné pásky [37]

Gramáž	Vazba	Šíře [cm]	Tloušťka [mm]
220 g/m <sup>2</sup>	jednosměrná	100	0,25

### 3.1.7 Uhlíková páska

Byla použita Carbon páska 155 od firmy Hexcel s gramáží 375 g/m<sup>2</sup> a šířkou 50 mm s označením 12K, což značí počet vláken v jednom svazku, tedy 12 000 a jedná se tak o nejpevnější vazbu, a UD značící typ vazby - jednosměrná. [38]

### 3.1.8 Uhlíková tkanina

Byla použita na vzorek sendviče s korkem, kdy z jedné strany korku byla uhlíková tkanina od firmy Hexcel s gramáží 98 g/m<sup>2</sup> a z druhé strany s gramáží 160 g/m<sup>2</sup> (viz Tabulka 9). Tyto materiály se používají především pro letectví, kosmické aplikace, nebo výrobu lodí. [39]

Tabulka 9 Vlastnosti použitých uhlíkových tkanin [39]

Gramáž	Vazba	Osnova	Útek	Šíře [cm]	Tloušťka [mm]
98 g/m <sup>2</sup>	plátňová	1K	1K	102	0,10
160 g/m <sup>2</sup>	plátňová	3K	3K	100	0,16

### 3.1.9 Korek

Nedílnou složkou korku je Suberin, který způsobuje to, že buněčná stěna korku je vzduchotěsná a nepropustná, od toho se odvíjí, že je chemicky odolný palivům, olejům či kyselinám. Dále se vyznačuje dobrými mechanickými vlastnostmi, a to nízkou tepelnou vodivostí a nízkou hmotností. Jeho velkou výhodou je snížení spotřeby pryskyřice, a tudíž i snížení hmotnosti finálního produktu. Neobsahuje žádná změkčovadla, která by způsobovala migraci a je odolný proti pryskyřicím na bázi styrenu, tzn. že se při styku s nimi nerozpouští. Jsou vyráběny korky s různou gramáží a odlišují se označením, např. NL 10 (140 kg/m<sup>3</sup>) a určením pro jednotlivé aplikace. Zde byl použit typ Corekork NL 20 MAT o tloušťce 1,3 mm. Používá se mimo jiné s použitím uhlíkových tkanin jako potah žeber na křídlech, nemá tedy funkci pevnostní, nýbrž podpůrnou. Výrobce je portugalská firma Amorim. [27]

### 3.1.10 Nerezová ocel

Byla použita stříbrolesklá nerezová ocel 15-5 PH od firmy Primapol v podobě plíšků o tloušťce 1,5 mm a hustotě 7,8 g/cm<sup>3</sup>, které sloužili k tomu, aby se nerozdrtilo vlákno v čelistích trhačky. Používá se na vybrané části v leteckém a kosmickém průmyslu, kvůli svým dobrým vlastnostem, jako je dobrá odolnost proti korozi a udržení mechanických vlastností až do teploty 316 °C. [40]

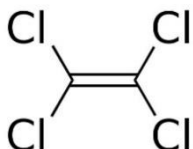
### 3.1.11 Překližka

Byla použita letecká březová překližka o tloušťce 2 mm od firmy Jaf holz, v tomto případě proto, že ji bylo jednodušší aplikovat, než-li složitě zvlášť lepit plechy z nerezové oceli, aby nedošlo k roztrhání vláken vzorku. Jedná se o křížovitě lepené březové dýhy. Jsou určeny především pro letecký průmysl pro více namáhané díly jako například ukotvení podvozku či vzpěry. [41]



### 3.1.12 Perchlor

Byl použit perchlor neboli tetrachlorethylen (viz Obrázek 22) od firmy Kittfort. Jedná se o těžkou, bezbarvou, nehořlavou kapalinu, která slouží jako rozpouštědlo organických látek, proto se používá v průmyslu k odmašťování kovů, v čistících prostředcích či v rafinériích. V tomto případě byl právě použit k odmaštění plíšků, aby se dobře přilepili k povrchu vzorku. [42]



Obrázek 22 Vzorec tetrachlorethylenu [42]

## 3.2 Výroba vzorků

### 3.2.1 Příprava plechů

Nejprve byl dlouhý kus plechu rozbroušen pomocí brusky, aby se zdrsnil jejich povrch a tím byla zvýšena adheze. Poté byl rozřezán na rozměry 25 x 10 mm. Několik hodin před nalepením byly ponořeny v perchloru, díky němuž byly odmaštěny, pro opětovné zvýšení adheze adheze.

### 3.2.2 Příprava skelných a uhlíkových pásek

1. Nejdříve byly připraveny pásky, skelné o velikosti 300 x 100 mm a uhlíkové 900 x 50 mm. Vzhledem k tomu, že byla potřeba výsledná tloušťka 1 mm, tak byly použity 3 vrstvy uhlíkové a 2 vrstvy skelné pásky (viz Obrázek 23).

2. Byl namíchán Epoxid L 285 s tužidlem 285. V první fázi se forma potřela PVA, aby se výsledný kompozit nepřilepil a poté se začaly prosycovat tkaniny. Sycení probíhalo kontaktním laminováním pomocí speciálního válečku. Vrstvy byly prosyceny rovnoměrně, a proto byla sycena nejprve spodní vrstva, poté na ní dána

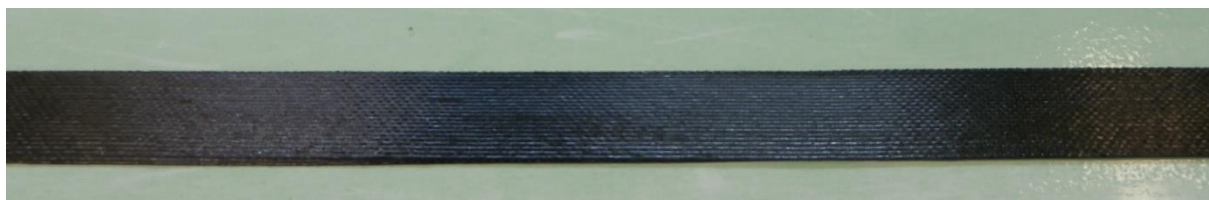


Obrázek 23 Nastříhané skelné a uhlíkové pásky

druhá, která byla taktéž prosycena a takto bylo postupováno i v dalších případech. Výsledkem byly prosycené tkaniny (viz Obrázek 24 a 25), které byly zatíženy dřevěnou deskou, která byla stažena svorkami (viz Obrázek 26 a 27) a nechána vytvrdit při pokojové teplotě cca 24 hodin.



*Obrázek 24 Prosycená skelná tkanina*



*Obrázek 25 Prosycená uhlíková tkanina*



*Obrázek 27 Zatížení uhlíkové tkaniny*



*Obrázek 26 Zatížení skelné tkaniny*

3. Po vytvrzení bylo odejmuto zatížení a pásy nařezány o délce 100 mm a šířce 10 mm. Byly zbrušeny konce vzorků v rozsahu 25 mm, aby lépe přilnulo lepidlo, kterým byly na konce přilepeny plechy z nerezové oceli, které byly nastříhány a taktéž na jedné straně zbrušeny (viz Obrázek 28).



Obrázek 28 Zbroušené konce vzorků

4. Pomocí lepidla (Araldit AW106 + tužidlo HV953U) byly přilepeny plechy a jako svorky použity kolíčky (viz Obrázek 29 a 30). Během lepení plechy klouzali a lepidlo přetévalo, a tak bylo třeba jej otírat, popřípadě po zaschnutí přebytečné lepidlo oříznout pomocí ostrého nože a zarovnat pilníkem.



Obrázek 29 Lepení plechů na uhlíkovém vzorku



Obrázek 30 Lepení plechů na skelném vzorku

### 3.2.3 Příprava sendvičů uhlík-korek

Nejdříve byly nastříhány uhlíkové tkaniny s gramáží 98 g/m<sup>2</sup>, 160 g/m<sup>2</sup> a korek. Poté bylo provedeno sycení jako u předešlých vzorků, kdy z jedné strany byla tkanina s menší gramáží, z druhé strany tkanina s větší gramáží a mezi nimi korek. Následně po vytvrzení byly přilepeny „pásky“ překližky (jejich výsledná velikost byla 10 x 25 mm), které posloužily místo plechů, aby se nerozdrtila vlákna při zkoušce v tahu. Vzorky byly rozřezány na velikost 100 x 10 mm a jejich výsledná tloušťka byla 1,5 mm. Jeden typ vzorku měl vlákna umístěná pod úhlem 45° ve směru tahu a ten druhý vlákna pod úhlem 90° ve směru tahu (viz Obrázek 31 a 32).



Obrázek 31 Vzorky sendviče uhlík-korek z pohledu tkaniny 98 g/m<sup>2</sup> pod úhly 90° a 45°



Obrázek 32 Vzorky sendviče uhlík-korek z pohledu tkaniny 160 g/m<sup>2</sup> pod úhly 90° a 45°

Příprava všech vzorků probíhala ve firmě ATEC v.o.s.

### 3.3 Metodika měření

Měření bylo inspirováno normou ČSN EN 2561, ale vzhledem k testovacím omezením jako jsou velikost tepelné komory a síla trhacího stroje, byla tato norma upravena, včetně upínací délky 50 mm a rychlostí posuvu příčky 2 mm/min. Tloušťka vzorků pro jednosměrné pásky byla 1 mm a pro oba dva typy sendvičů 1,5 mm.

#### 3.3.1 Trhací stroj MTS-4/M

Jedná se o kompaktní, jednoduchý a jednofázový trhací přístroj MTS Adamel Lhomargy 4/M (viz Obrázek 33) s mechanickými čelistmi, které mají namontovaný rychloupínací trn. Maximální možná síla v tahu i tlaku je u tohoto typu 20 kN a lze ho připojit k periferním zařízením jako jsou tiskárna či zapisovač. Splňuje požadavky norem NF. A 03-501 třída O, ASTM E4, BS 1610 a DIN 51220 třída 0,5.

Jedná se o statickou zkoušku, kdy se vzorek umístí do kleštin a je natahován silou, až do jeho přetržení. Z výsledků lze zjistit mez pevnosti, modul pružnosti, tažnost nebo prodloužení při porušení. Pro sledování teplotní závislosti při 40 a 60 °C byla použita tepelná komora Chaixmeca FC S42 (viz Obrázek 34). Bylo provedeno celkem 10 měření pro každý vzorek. Vzhledem k velké pevnosti uhlíkové pásky při 20 °C, byl tento typ měřen za stejných podmínek (upínací délka 50 mm a rychlost posuvu příčky 2 mm/min) firmou SYNPO a.s. na trhacím stroji Zwick/Roell Z050 o maximálním zatížení 50 kN. [42], [43]



Obrázek 33 Trhací stroj MTS - 4/M



Obrázek 34 Tepelná komora Chaixmeca FC S42

## 4 VÝSLEDKY

### 4.1.1 Skelná páska

Výsledky měření vybraných tahových vlastností pro skelnou pásku (viz Tabulka 10).

Tabulka 10 Výsledky měření skelné pásky

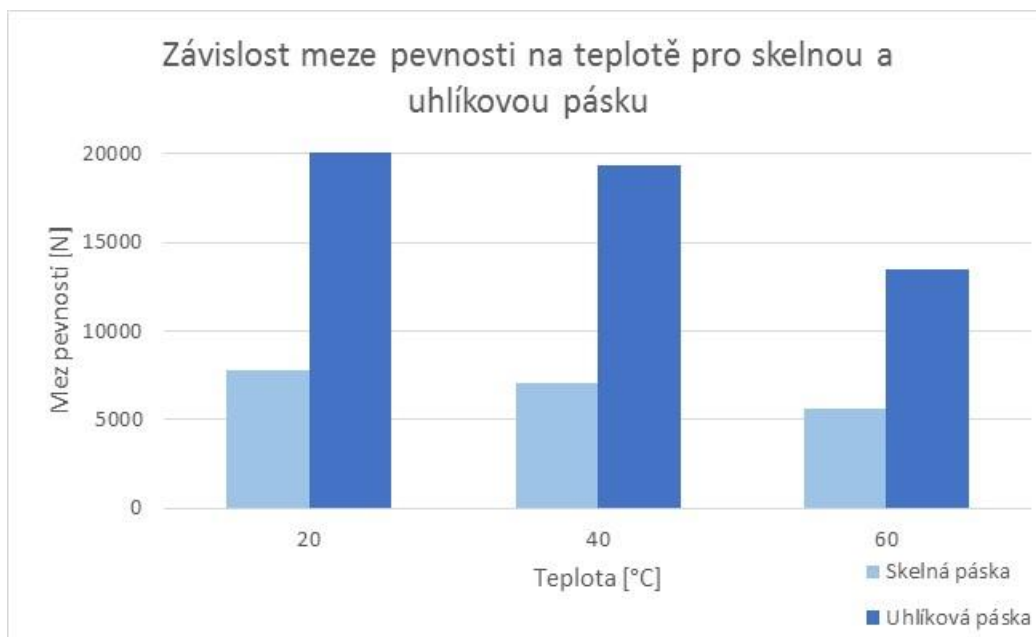
Materiál	Teplota [°C]	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Modul [MPa]	Tažnost %
Skelná páska	20	7800,73 ± 731,87	685,58 ± 96,34	21433,43 ± 3455,87	4,80 ± 0,63
	40	7099,18 ± 1083,87	622,84 ± 86,76	15177,22 ± 3049,34	5,91 ± 0,87
	60	5581,68 ± 779,59	498,06 ± 67,82	12227,36 ± 3078,00	5,46 ± 0,64

### 4.1.2 Uhlíková páska

Výsledky měření vybraných tahových vlastností pro uhlíkovou pásku (viz Tabulka 11).

Tabulka 11 Výsledky měření uhlíkové pásky

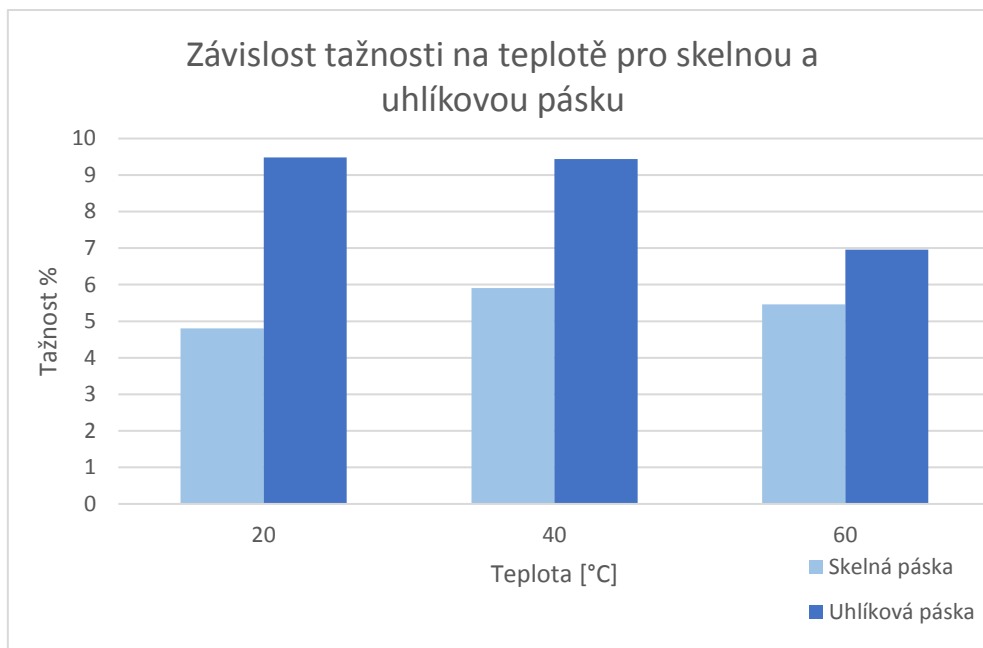
Materiál	Teplota [°C]	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Modul [MPa]	Tažnost %
Uhlíková páska	20	20059,86 ± 1471,44	1822,48 ± 203,10	40074,33 ± 6109,94	9,48 ± 0,77
	40	19371,26 ± 503,22	1873,43 ± 157,97	31536,81 ± 4968,46	9,44 ± 0,92
	60	13519,72 ± 1052,66	1300,99 ± 131,44	23207,45 ± 3692,77	6,96 ± 0,54



Graf 1 Závislost meze pevnosti na teplotě pro uhlíkovou a skelnou pásku

Z Grafu 1 lze vidět, že mez pevnosti pro uhlíkovou pásku je cca trojnásobně větší než pro skelnou a s rostoucí teplotou v obou případech klesá. Z dalších údajů v tabulkách lze usoudit, že modul také klesá s rostoucí teplotou a je opět vyšší pro uhlík. Tažnost se v obou případech s rostoucí teplotou naopak zvětšuje a nabývá větších hodnot u uhlíkové pásky (viz Graf 2). Ovšem to neznamená, že vždy je lepší použít uhlík, je nutné přihlídnout k dané aplikaci.

Problémem testování uhlíkových pásek bylo najít správné lepidlo, které by mělo natolik velkou adhezi k povrchu vzorků, že by se neuvolnilo ve smyku, a proto byly použity Araldit 160 a Araldit 2014, který měl vydržet zatížení při teplotách až 120 °C. Ve skutečnosti však při teplotě 60 °C ztrácel pevnost ve smyku a vzorky se trhaly spíše podélně, proto je možné, že skutečná hodnota pevnosti v tahu, tažnost i modul pro 60 °C jsou o něco málo vyšší.



Graf 2 Závislost tažnosti na teplotě pro skelnou a uhlíkovou pásku

#### 4.1.3 Uhlíkový sendvič s korkovou výplní s vlákny orientovanými 90° ve směru tahu

Výsledky měření vybraných tahových vlastností pro sendvič uhlík korek s vlákny orientovanými 90° ve směru tahu (viz Tabulka 12).

Tabulka 12 Výsledky měření uhlíkového sendviče s korkovou výplní a vlákny umístěnými pod úhlem 90°

Materiál	Teplota [°C]	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Modul [MPa]	Tažnost %
Uhlík-korek-uhlík 90°	20	1418,51 ± 97,89	89,16 ± 8,25	6567,6 ± 329,76	1,75 ± 0,42
	40	1523,83 ± 156,47	94,6 ± 7,47	5850,58 ± 188,63	1,91 ± 0,39
	60	1156,45 ± 98,42	71,31 ± 5,94	4045,35 ± 247,95	1,94 ± 0,41

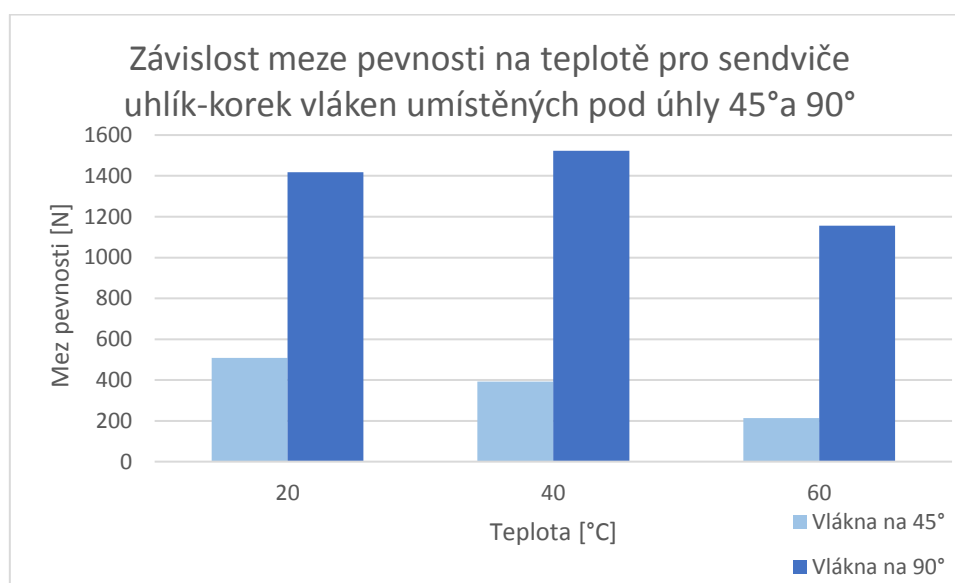
#### 4.1.4 Uhlíkový sendvič s korkovou výplní s vlákny orientovanými 45° ve směru tahu

Výsledky měření vybraných tahových vlastností pro sendvič uhlík korek s vlákny orientovanými 45° ve směru tahu (viz Tabulka 13).



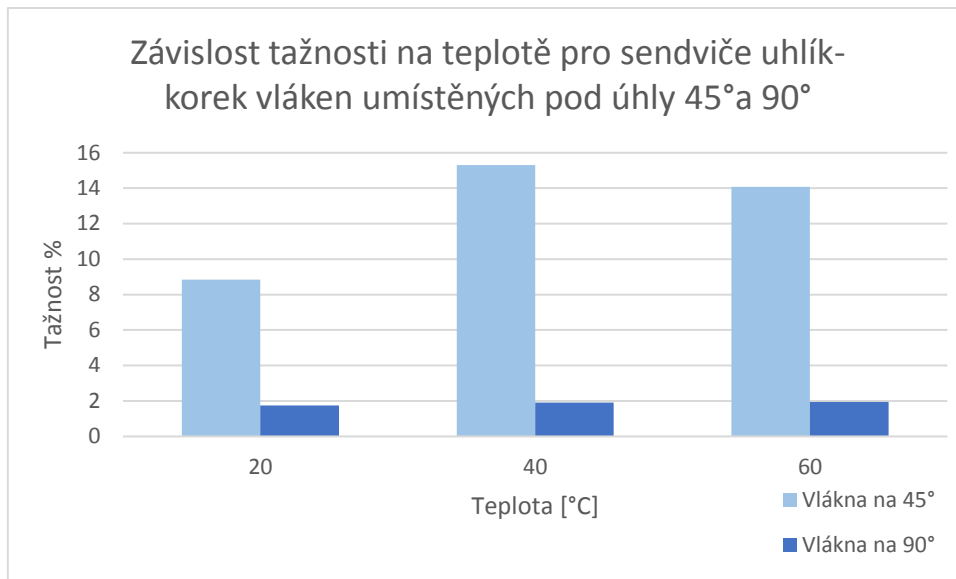
Tabulka 13 Výsledky měření uhlíkového sendviče s korkovou výplní a vlákny umístěnými pod úhlem 45°

Materiál	Teplota [°C]	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Modul [MPa]	Tažnost %
Uhlík-korek-uhlík 45°	20	509 ± 20,22	32,24 ± 1,11	1728,21 ± 153,18	8,84 ± 1,02
	40	391,8 ± 40,79	24,62 ± 2,74	685,71 ± 134,23	15,3 ± 1,69
	60	213,91 ± 21,19	13,78 ± 1,15	122,53 ± 10,06	14,08 ± 1,00



Graf 3 Závislost meze pevnosti na teplotě pro vzorky sendviče uhlík - korek s vlákny umístěnými pod úhly 45° a 90° ve směru tahu

Z Grafu 3 lze vidět, že mez pevnosti pro sendvič, který měl tkaninu orientovanou 45° na působení tahu je cca trojnásobně menší než pro sendvič, který měl tkaninu orientovanou 90° na působení v tahu a s rostoucí teplotou klesá. Z dalších údajů v tabulkách lze usoudit, že modul u 45° je výrazně nižší a s rostoucí teplotou klesá prudčeji než-li u vzorku 90° a tažnost roste s rostoucí teplotou (viz Graf 4) a je větší u vzorku s vlákny orientovanými pod úhlem 45°.



Graf 4 Závislost tažnosti na teplotě pro vzorky sendviče uhlík - korek s vlákny umístěnými pod úhly 45° a 90° ve směru tahu

## 5 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce byla rešerše na téma vybraných používaných kompozitních materiálů převážně v letectví. První část byla věnována představení kompozitu, popisu vybraným matricím a výztužím, jejich použití a vlastnostem, v druhé části byly popsány některé možné způsoby laminace.

V experimentální části byla testována pevnost v tahu a porovnání skelné versus uhlíkové pásky a sendvičů uhlíková tkanina – korek s vlákny umístěnými na  $45^\circ$  ve směru tahu versus s vlákny umístěnými pod úhlem  $90^\circ$  ve směru tahu.

Z výsledků vyplývá, že značně nejpevnější byla uhlíková páska, a naopak nejslabší sendvič uhlíková tkanina – korek s vlákny umístěnými pod úhlem  $45^\circ$ . Při porovnání uhlíkové a skelné pásky vyšla uhlíková lépe, ale její nevýhodou je vyšší cena, naopak výhodou nízká hmotnost, proto se používá v letectví na nosníky a skelná páska je používána například na podvozek. Při porovnání sendvičů, tak pevnostně vyšel lépe ten s vlákny orientovanými pod úhlem  $90^\circ$ . Oba dva typy sendvičů se používají do křídel jako potah na žebra, ten s vlákny pod úhlem  $45^\circ$  se používá například i do trupu. Cílem bylo také zjistit, jak moc ovlivní zvýšená teplota pevnost těchto materiálů a ukázalo se, že do  $60^\circ\text{C}$  se pevnost mění zhruba o třetinu od pevnosti při laboratorní teplotě. Vždy je nutné přihlídnout k požadovaným vlastnostem pro danou aplikaci. Dále by se z naměřených hodnot dala vypočítat pevnost v tahu pro konkrétní díly, ale to je nad rámec této bakalářské práce.

## 6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KRATOCHVÍL, ŠVORČÍK a DALIBOR: *Úvod do studia materiálů*. 1.vydání Praha: VŠCHT, 2005. ISBN 978-80-7080-568-8.
- [2] PROKOPOVÁ: *Makromolekulární chemie*. 2.vydání Praha: VŠCHT, 2007. ISBN 978-80-7080-568-8.
- [3] CAMPBELL: *Structural Composite Materials* [online]. 1.vydání Ohio: ASM International, 2010. [cit.2017-03-22]. ISBN978-1-61503-037-8. Dostupné z: <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSCM00001/structural-composite/structural-composite>
- [4] Polyesterová pryskyřice: Havelpol 5. *Havel composite* [online]. [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/proddocs/HAVELPOL%205.pdf>
- [5] Polyesterová pryskyřice: Havelpol H 834-REA-30. *Havel composite* [online]. [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: [http://www.havel-composites.com/proddocs/TL%20Polyesterova\\_pryskyrice\\_Havelpo\\_H\\_834\\_REA\\_30.pdf](http://www.havel-composites.com/proddocs/TL%20Polyesterova_pryskyrice_Havelpo_H_834_REA_30.pdf)
- [6] MIK: *Amatérská výroba laminátových kánoí a kajaků*. 1.vydání Praha: Olympia, 1980.
- [7] ŠŇUPÁREK: *Makromolekulární chemie: Úvod do chemie a technologie polymerů*. 3.vydání Pardubice: UPCE, 2014.
- [8] BAKER, DUTTON, KELLY: *Composite Materials for Aircraft Structures* [online]. [cit. 2017-03-15]. 2. vydání, American Institute of Aeronautics and Astronautics., 2004. Dostupné z: <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCMASE001/composite-materials-aircraft/composite-materials-aircraft>
- [9] FINK, KARL: *Reactive Polymers Fundamentals and Applications - A Concise Guide to Industrial Polymers* [online]. [cit. 2017-03-15]. 2.vydání, Elsevier. 2013. Dostupné z: <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpRPFAAC05/reactive-polymers-fundamentals/reactive-polymers-fundamentals>
- [10] Technický list: laminační pryskyřice L 285; tužidla 285, 286, 287. *Docplayer* [online]. [cit. 2017-03-6]. 2016. Dostupné z: <http://docplayer.cz/14122489-Technicky-list-l-a-m-i-n-a-c-n-i-p-r-y-s-k-y-r-i-c-e-l-285-t-u-z-i-d-l-a-285-286-287-navod-k-pouziti-technicke-listy.html>
- [11] GUDMUNDSSON: *General Aviation Aircraft Design - Applied Methods and Procedures* [online]. [cit. 2017-03-15]. 2014. Dostupné z: <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpGAADAMP8/general-aviation-aircraft/general-aviation-aircraft>

- [12] YU, BULL: *Durability of Materials and Structures in Building and Civil Engineering*. Whittles Publishing. [online]. [cit. 2017-03-13]. 2006. Dostupné z: <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpDMSBCE01/durability-materials/durability-materials>
- [13] Pomocné materiály a příslušenství: separátory a plniva. *Havel composite* [online]. [cit. 2017-03-13]. 2017 Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/proddocs/TL%20ZAKL%20VOSK%20CZ.pdf>
- [14] Pomocné materiály a příslušenství: separátory a plniva. *Havel composite* [online]. [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/proddocs/TR%20104.pdf>
- [15] Pomocné materiály a příslušenství: separátory a plniva. *Havel composite* [online]. [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/proddocs/Oskar%20M%20700.pdf>
- [16] Pomocné materiály a příslušenství: separátory a plniva. *Havel composite* [online]. [cit. 2017-03-13]. 2017. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/proddocs/TL%20PVA%20ECO%20CZ.pdf>
- [17] Conrad [online]. [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: [https://img.conrad.de/medias/global/ce/2000\\_2999/2300/2380/2380/238066\\_BB\\_02\\_FB.EPS\\_1000.jpg](https://img.conrad.de/medias/global/ce/2000_2999/2300/2380/2380/238066_BB_02_FB.EPS_1000.jpg)
- [18] PROCHÁZKA: *Konstrukce forem pro RTM technologie*, Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Doc. Ing. Soňa Rusnáková PhD. [online]. [cit. 2017-06-11]. Zlín, 2012. Dostupné z: <http://docplayer.cz/15212808-Konstrukce-forem-pro-rtm-technologie-jaroslav-prochazka.html>
- [19] Carbon fiber tape. *Carbon fiber Australia* [online]. [cit. 2017-03-31]. Dostupné z: <http://www.carbonfiber.com.au/images/022wm.jpg>
- [20] HIROSHI: High-performance fibres, *Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. 17. vydání, Wiley-VCH: Weinheim 2011. ISBN: 9783527306732
- [21] POLK: High performance fibres, *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. 5. vydání, Wiley-Interscience 2005. ISBN: 9780471238966
- [22] ILSCHNER: Composite materials, *Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. 17. vydání, Wiley-VCH: Weinheim 2011. ISBN: 9783527306732
- [23] GALINI: Polyamides, Aromatic, *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. 5. vydání, Wiley-Interscience 2005. ISBN: 9780471238966
- [24]. FREDERICK WALLENBERGER, WATSON: Carbon Fibers, v *ASM Handbook: Composites* [online]. [cit. 2017-04-09]. 21.vydání ASM International, 2001 ISBN 978-0-

87170-703-1.

Dostupné

z:

[http://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/06781G\\_p27-34.pdf](http://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/06781G_p27-34.pdf)

[25] CHEN: *Activated Carbon Fiber and Textiles* [online]. [cit. 2017-03-10]. 1.vydání Elsevier, 2017. ISBN 978-0-08-100660-3. Dostupné z: <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpACFT0001/activated-carbon-fiber/activated-carbon-fiber>

[26] Type of carbon fiber: Type of Carbon Fiber Products and their Special Features. *Tha Japan Carbon Fiber Manufactures Association* [online]. [cit. 2017-03-10]. 2002-2017. Dostupné z: <http://www.carbonfiber.com.au/images/022wm.jpg>

[27] Dowlands: Corecork (EN). *Amorim cork composites* [online]. [cit. 2017-03-12]. 2016. Dostupné z: <http://www.amorimcorkcomposites.com/media/2416/corecork-brochure.pdf>

[28] Construction of composite fuselage section of a Boeing 787. *Youtube* [online]. [cit. 2017-04-7]. 8. 10. 2008. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=\\_GDqxnahwbk](https://www.youtube.com/watch?v=_GDqxnahwbk). Kanál uživatele enviroaero

[29] Technologie: Technologie jejich popis a schémata. *Havel composite* [online]. [cit. 2017-04-07]. 2014. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>

[30] *Pressure Control Applications: International site for Spirax Sarco* [online]. [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: [http://pointing.spiraxsarco.com/images/resources/steam-engineering-tutorials/8/1/fig\\_8\\_1\\_11.jpg](http://pointing.spiraxsarco.com/images/resources/steam-engineering-tutorials/8/1/fig_8_1_11.jpg)

[31] How To Do Perfect Vacuum Resin Infusion of a Carbon Fibre (Fiber) Part - Basic Tutorial. *Youtube* [online]. [cit. 2017-04-7]. 19. 12. 2010. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=VodfQcrXpxc>. Kanál uživatele Easy Composites Ltd

[32] Composites 101 (Vacuum bagging carbon fiber). *Youtube* [online]. [cit. 2017-04-7]. 15. 6. 2014. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=T4ZFj4fItWE>. Kanál uživatele Adventure Aircraft

[33] How To Make Your Own Carbon Fiber (Fibre) Parts. *Youtube* [online]. [cit. 2017-04-7]. 20. 11. 2008. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=IAdVO8Rkv6c>. Kanál uživatele Carbon Mods

[34] Projection robotisée de renfort sur piscine - Robotic spray-up of chopped laminate on pool. *Youtube* [online]. [cit. 2017-04-7]. 16. 5. 2013. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=eWBZej4hiFA>. Kanál uživatele MatrasurComposites

[35] Adhesives. *Huntsman* [online]. [cit. 2017-05-03]. 2004. Dostupné z: [http://adhesive.leaderseal.com/download/TDS-A106-953\(US\).pdf](http://adhesive.leaderseal.com/download/TDS-A106-953(US).pdf)

- [36] Konstrukční lepidla: Araldit. *LEPIDLA CENTRUM* [online]. [cit. 2017-05-03]. 1996. Dostupné z: [http://www.lepidla-eshop.cz/static/\\_dokumenty/2/0/2/2014.pdf](http://www.lepidla-eshop.cz/static/_dokumenty/2/0/2/2014.pdf)
- [37] Sklo: Skelné výztuže. *grm system* [online]. [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: <http://www.grm-systems.cz/skelne-vyztuze#top>
- [38] Materiály pro laminaci: Tkaniny pro epoxidové kompozity. *Skolil kompozit* [online]. [cit. 2017-05-08]. 2010. Dostupné z: <http://www.skolil.cz/materialy-pro-laminaci/polyesterove-laminacni-systemy/49-pasky-carbon-aramid-sklo>
- [39] Materiály pro laminaci: Tkaniny pro epoxidové kompozity. *Skolil kompozit* [online]. [cit. 2017-05-29]. 2010. Dostupné z: <http://www.skolil.cz/materialy-pro-laminaci/polyesterove-laminacni-systemy/50-carbonove-tkaniny>
- [40] Surové materiály: Nerezová ocel. *Primapol* [online]. [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: <http://www.primapol.cz/catalogue/product/37550>
- [41] Deskové materiály: Překližka. *maph* [online]. [cit. 2017-05-31]. Dostupné z: <http://www.maph.cz/deskove-materialy/preklizka/preklizka-truhlarska>
- [42] Chemické látky: tetrachlorethylen (perchlor). *ARNIKA* [online]. [cit. 2017-05-29]. 2014. Dostupné z: <http://arnika.org/tetrachlorethylen-perchlor>
- [43] *Střední škola strojírenská a elektrotechnická Brno* [online]. [cit. 2017-06-1]. 2012. Dostupné z: [http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/tahova\\_zkouska.pdf](http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/tahova_zkouska.pdf)
- [44] Uživatelský manuál trhačícího stroje MTS-4/M, LABTECH, spol s. r. o., Brno