



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ POMOCÍ VAKUOVÉ INFUZE

PRODUCTION OF COMPOSITE MATERIALS USING VACUUM INFUSION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adam Círan

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Zouhar,
Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Adam Círan**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Jan Zouhar, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Výroba kompozitních materiálů pomocí vakuové infuze

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vakuová infuze je jednou z nejpoužívanějších metod při výrobě kvalitních kompozitů. Tato metoda je výhodná díky malým investičním nákladům i pro výrobu velkých dílů, řádově metrů. Při správném použití lze dosáhnout stejných vlastností kompozitu jako při výrobě v autoklávu, z tohoto důvodu je v poslední době v některých aplikacích autokláv nahrazován. Použití metody má ale i svá specifika a nebezpečí při zanedbání základních zásad výroby.

Cíle bakalářské práce:

- Rešeršní část technologií výroby kompozitu, jejich srovnání.
- Teorie vakuové infuze a použité materiály.
- Výroba vzorků, určení technologických parametrů.
- Technicko–ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

CAMPBELL, F. C. ASM INTERNATIONAL. Structural Composite Materials. Materials Park: A S M International, 2010. ISBN 9781615030378.

Composite materials handbook. Volume 1. Polymer matrix composites guidelines for characterization of structural materials. USA: SAE International on behalf of CMH-17, a division of Wichita State University, 2012. 700 s. ISBN 978-0-7680-7811-4.

BOGOLJUBOV, N. N. Composite Manufacturing Technology. London: Chapman & Hall, 1995. 433 s.

MALLICK, P. K. Composites engineering handbook. New York: Marcel Dekker, 1997. 1249 s. ISBN 0-8247-9304-8.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalárska práca sa v teoretickej časti zaoberá definíciou kompozitného materiálu, ďalej rozdelenie najpoužívanejších látkových výstuží a matric, so zameraním na výstuže zo skleného a uhlíkového vlákna a vlákna z ľanu. Následne rozbor vákuových infúzných techník ich popis a využitie. V praktickej časti je kladený dôraz na výrobu vzoriek pomocou technológie vákuovej infúzie z uhlíkového, skleného vlákna a ľanu s použitím epoxidovej matrice. Posledná časť je zhodnotenie vyrobených vzoriek.

Kľúčová slova

vákuová infúzia, uhlíkové vlákno, sklené vlákno, vlákno z ľanu, epoxidová živica

ABSTRACT

The theoretical part of the bachelor thesis deals with the definition of composite material, then the division of the most used fabric reinforcements and matrices, with a focus on reinforcements made of glass and carbon fiber and flax fiber. It then discusses vacuum infusion techniques, their description and applications. In the practical part, emphasis is placed on the fabrication of specimens using vacuum infusion technology of carbon fiber, glass fiber and flax using an epoxy matrix. The last part is the evaluation of the fabricated samples.

Key words

vacuum infusion, carbon fiber, glass fiber, flax fiber, epoxy resin

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

CIRAN, Adam. *Výroba kompozitních materiálů pomocí vakuové infuze* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/136915>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jan Zouhar.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na téma Výroba kompozitních materiálů pomocí vakuové infuze vypracoval samostatne s využitím uvedenej literatúry a podkladov, na základe konzultácii a pod vedením vedúceho práce.

místo, datum

Adam Círan

POĎAKOVANIE

Ďakujem týmto Ing. Janovi Zouharovi, Ph.D. za cenné pripomienky a rady, ktoré mi poskytol pri vypracovaní bakalárskej práce.

OBSAH

ÚVOD	9
1 TEORETICKÁ ČASŤ	10
1.1 Kompozitné materiály	10
1.1.1 Požiadavky na kompozity	10
1.2 Chovanie vláknami vystužených kompozitných materiálov	11
1.2.1 Anizotropia	11
1.2.2 Synergický efekt	13
1.2.3 Paradox vláknitej štruktúry	13
1.2.4 Paradox zaťaženia dĺžky	13
1.3 Polymérne kompozitné materiály	13
1.3.1 Vlastnosti polymérnych kompozitov	14
1.3.2 Nenasýtené polyesterové živice	14
1.3.3 Epoxidové živice	14
1.3.4 Vynilesterové živice	14
1.3.5 Fenolické živice	15
1.4 Vlákňová výstuž	15
1.5 Typy vláknovej výstuže	16
1.5.1 Sklenené vlákna	17
1.5.2 Prírodné vlákna	17
1.5.3 Uhlíkové vlákna	18
1.5.4 Aramidové vlákna	20
1.6 Porovnanie vlákien	20
1.7 Úprava vlákien	21
1.7.1 Organosilany	21
1.7.2 Spreading	21
1.7.3 Úpravy uhlíkových vlákien	21
1.7.4 Úpravy aramidových vlákien	22
1.8 Vákuová infúzia	22
1.8.1 Všeobecný popis vákuových infúzných techník	22
1.8.2 Infúzne metódy	23
1.8.3 Zhrnutie infúzných procesov	24
2 PRAKTICKÁ ČASŤ	26
2.1 Kompozitné vzorky	26
2.1.1 Použité Tkaniny	26
2.1.2 Použitá živica	27
2.1.3 Výroba vzoriek	27
3 ZHODNOTENIE KOMPOZITNÝCH VZORIEK	34
3.1 Hmotnostný a objemový podiel	36
3.2 Ekonomické zhodnotenie	38
ZÁVER	39

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV
ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK
ZOZNAM PRÍLOH

ÚVOD

Už od pradávna člověk hledal ten nejvhodnější materiál, který by se mu hodil pro jeho využití, jako například nejlepší kámen na jeho sekeru. Takto to pokračovalo dále dlouhou dobu bez většího posunu v před. Za jedny z prvních nájdených kompozitů se dají považovat hliněné tehly, které se skládaly z hlíny a slamy a byly pálené na slnku. Jeden z nejvýznamnějších kompozitů používaný v současnosti i v dnešní době můžeme považovat za beton zesílený ocelovými dráty, kvůli kterému stojí většina dnešních výškových budov.

Používání kompozitních materiálů pro svou vyšší cenu má uplatnění zejména v letectví, avšak v současnosti se často setkáváme s použitím kompozitů z uhlíkových vláken v motosportu. Kompozitní materiály jsou v současnosti vytvářeny přímo pro určité specializace, v nichž se dbá zejména na vlastnosti těchto materiálů. Není třeba vymýšlet a konstruovat dokonalé materiály, pokud by v konečné aplikaci neměli využití.

Vláknové kompozitní materiály jsou rychle se rozvíjející skupinou materiálů v průmyslu. V rámci získání nejlepších vlastností výsledného produktu se využívají různé druhy vláken a také různé druhy matic. Poznáme různé technologie výroby kompozitů od nejjednoduchších, při kterých se volně ukládají tkaniny na sebe až po ty složitější, jako je vakuová infúze.

Ve své teoretické části se budu zabývat rozdělením a vlastnostmi různých tkanin, použitím a vlastnostmi nejpoužívanějších matic. Technologii výroby kompozitních materiálů pomocí vakuové infúze také rozoberiem v rešeršnej časti práce.

V praktické části se budu zabývat výrobou kompozitních vzorků z různých materiálů a jejich kombinací. Popísaním použitej technologie vakuovej infúzie a na koniec zhodnotím vyrobené vzorky.

1 TEORETICKÁ ČASŤ

1.1 Kompozitné materiály

Kompozity sú pre svoje vlastnosti využívané veľmi často v moderných výrobných technológiách. Využitím tejto výrobnéj technológie sa dosahuje veľmi vysokých hodnôt mechanických vlastností, pri veľmi nízkej hustote čiže hmotnosti prvku.

Kompozit je tvorený dvoma či viacerými zložkami a fázami, ktoré sa významne od seba líšia chemickými, fyzikálnymi a mechanickými vlastnosťami. Tvrďšia a tuhšia nespojitá fáza sa nazýva disperze (výstuž). Väčšinou poddanejšia a spojitá fáza, ktorá je používaná ako pojivo výstuže sa nazýva matrica. V súčasnej dobe označujeme za kompozity materiály ktoré v určitej miere spĺňajú nasledujúce podmienky. Podiel disperzie je aspoň 5%. Chemické, fyzikálne a mechanické vlastnosti zložiek a fázy sa od seba výrazne líšia. Kompozitné materiály sa vyznačujú takzvaným synergizmom, čo znamená, že vlastnosti prvkov v celku sú lepšie, ako súčet vlastností prvkov ktoré sú situované zvlášť.

Jediná, všeobecne uznávaná a jasná definícia kompozitu neexistuje. Definícia používaná v USA ktorú vytvorila NASA v spolupráci a americkým vojenským vývojovým centrom: Kompozitný materiál je kombinácia dvoch alebo viacerých materiálov (vystužovacie elementy, výplň a spojovacia matrica), rozdielných v makromerítke tvarom alebo zložením. Zložky si v nich zachovávajú svoju identitu (vzájomne sa úplne nerozpúšťajú ani nezlučujú), avšak na svoje okolie pôsobia v súčinnosti. Každá zložka môže byť fyzikálne identifikovaná a medzi ňou a ďalšími zložkami je rozhranie [1].

Ďalšia definícia je podľa G. F. Milтона:

Kompozity sú materiály, v ktorých sú dĺžkové nehomogenity v rozmeroch omnoho väčšie, než sú atómové (čo nám umožňuje používať pre tieto nehomogenity rovnice klasickej fyziky), ktoré sú ale v makroskopickom mierke prirodzene (staticky) homogénne. [1]

1.1.1 Požiadavky na kompozity

Cieľavedomé vytváranie nových kompozitných materiálov má za účel splnenie niektorých požiadavkou, ktoré u bežných materiálov nie sú dosiahnuteľné. Najčastejšie ide o tieto požiadavky:

- zvýšenie pevnosti (obzvlášť špecifickej pevnosti – pomeru medze pevnosti a hustoty)
- zvýšenie tuhosti (najmä špecifickej tuhosti – pomeru Youngovho modelu a hustoty)
- zvýšenie stability
- zvýšenie rozmerovej stability
- zvýšenie húževnatosti (odstránenie krehkosti)
- zvýšenie teplotnej stability (rozšírenie teplotného intervalu použiteľnosti)
- modifikácie elektrických vlastností (zvýšenie respektíve zníženie elektrickej vodivosti)
- zvýšenie mechanického tlmenia (antihlukové a antivibračné materiály)
- zníženie priepustnosti voči kvapalinám a plynom
- zmenšenie teplotnej rozťažnosti
- zvýšenie chemickej a koróznej odolnosti
- udržanie tuhosti alebo pevnosti pri vysokej teplote

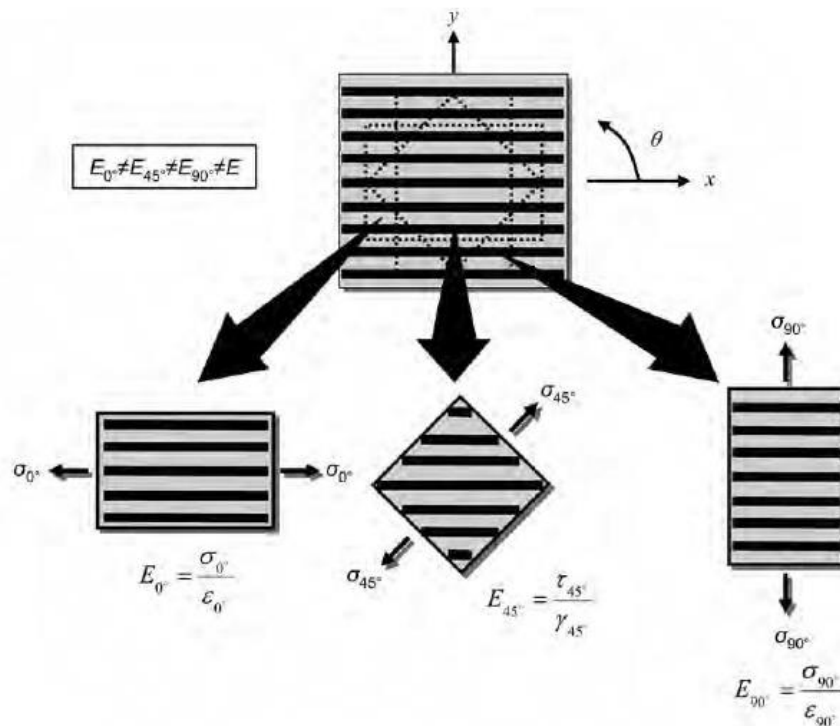
- zníženie negatívneho dopadu na prírodu
- redukcia hmotnosti
- zníženie ceny

1.2 Chovanie vláknami vystužených kompozitných materiálov

1.2.1 Anizotropia

Kompozitné materiály sú väčšinou anizotropné, na rozdiel od bežných technických materiálov, ako sú napríklad zliatiny kovov, ktorú sú väčšinou úplne izotropné, alebo vykazujú iba čiastočnú anizotropiu. Vlastnosti izotropných materiálov sú vo všetkých smeroch namáhania rovnaké a normálové normálové zaťaženia vytvárajú len normálové deformácie. Materiál anizotropný bude vykazovať vo všetkých smeroch v ktorých je namáhaný, absolútne rozdielne vlastnosti. Ortotropné materiály majú vlastnosti symetrické v troch na seba kolmých rovinách, avšak v každej z rovín sú izotropné. Pseudoizotropné materiály majú rovnaké elastické vlastnosti symetrické v troch na seba kolmých osiach. Posledný typ je prične izotropný materiál, ktorý má tri roviny symetrie, ale len v jednej rovine vykazuje izotropné vlastnosti.

Uvažujme napríklad prvok izotropného materiálu znázorneného na obr. 1. Ak je materiál zaťažený v smeroch 0° , 45° a 90° , modul pružnosti (E) je rovnaký v každom smere ($E_{0^\circ} = E_{45^\circ} = E_{90^\circ}$). Ak je však materiál anizotropný, má vlastnosti ktoré sa v rámci materiálu menia v závislosti od smeru. V tomto materiály sú moduly v každom smere odlišné ($E_{0^\circ} \neq E_{45^\circ} \neq E_{90^\circ}$). Zatiaľ čo modul pružnosti, rovnaká závislosť od smeru sa môže vyskytnúť aj pri iných lastnostiach materiálu, napríklad pri pevnosti v tlaku, Poissonovom pomere a koeficiente tepelnej rozťažnosti [2].

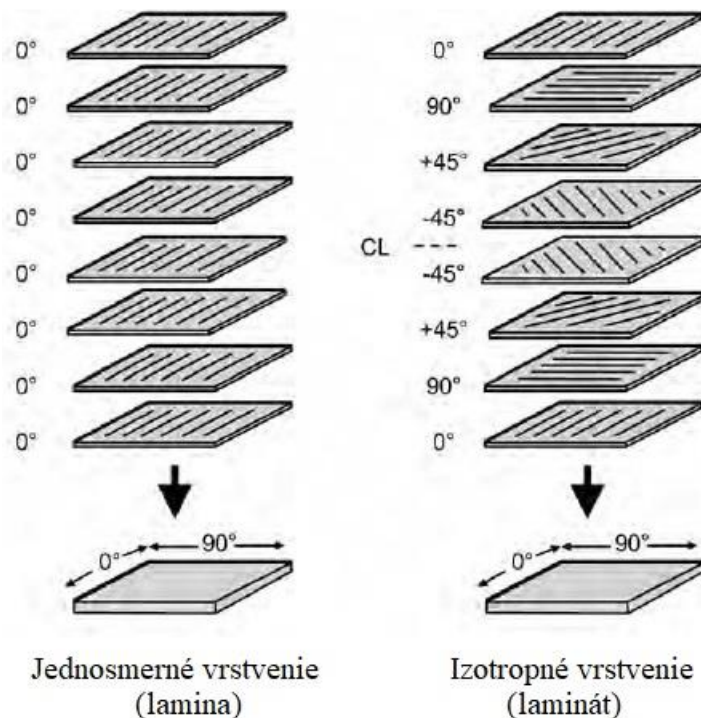


Obr. 1: Jednotlivé prvky kompozitného materiálu pod napätím [2].

S objemovými materiálmi, ako sú kovy a polyméry, sa zvyčajne zaobchádza ako s izotropnými materiálmi, zatiaľ čo kompozity sa považujú za anizotropné. Avšak aj objemové materiály, ako sú kovy, sa môžu stať anizotropnými - napríklad ak sú opracované za studena, aby sa dosiahlo usporiadanie zŕn v určitom smere . [2]

Ak ide o jednu vrstvu alebo vrstvu, v ktorej sú všetky vrstvy alebo vrstvy uložené v rovnakej orientácii, vrstva sa nazýva lamina. Ak sú vrstvy uložené pod rôznymi uhlami, vrstva sa nazýva laminát. Kompozity s kontinuálnymi vláknami sú zvyčajne vrstvené materiály v ktorých sú jednotlivé vrstvy, pláty alebo lamely sú orientované v smeroch, ktoré zvýšia pevnosť v primárnom smere zaťaženia. Jednosmerné (0°) lamely sú mimoriadne pevné a tuhé v smere 0° . Sú však veľmi slabé v smere 90° , pretože zaťaženie sa musí prenášať oveľa slabšia polymérna matrica. Zatiaľ čo vysokopevnostné vlákno môže mať ťahovú pevnosť v ťahu 3500 MPa alebo viac, typická polymérna matrica má zvyčajne pevnosť v ťahu len 35 až 70 MPa. Pozdĺžne zaťaženie v ťahu a tlaku prenášajú vlákna, zatiaľ čo matrica rozkladá zaťaženie medzi vláknami v ťahu a stabilizuje vlákna a zabraňuje ich vybočeniu v tlaku. Matrica je tiež primárnym nositeľom zaťaženia pri medzilamelovom šmyku (t. j. šmyku medzi vláknami, vrstvami) a priečneho (90°) ťahu . [2]

Keďže orientácia vlákien priamo ovplyvňuje mechanické vlastnosti, zdá sa logické orientovať čo najviac vrstiev v hlavnom nosnom smere. Hoci tento prístup môže v prípade niektorých štruktúr fungovať, zvyčajne je potrebné vyvážiť schopnosť prenášať zaťaženie vo viacerých rôznych smeroch, ako napr. 0° , $+45^\circ$, -45° a 90° . Vyvážený laminát s rovnakým počtom vrstiev v 0° , $+45^\circ$, -45° a 90° stupňov je sa nazýva kváziizotropný laminát, pretože nesie rovnaké zaťaženie vo všetkých štyroch smeroch . [2]



Obr. 2: Vrstvenie lamina a laminátu [2].

1.2.2 Synergický efekt

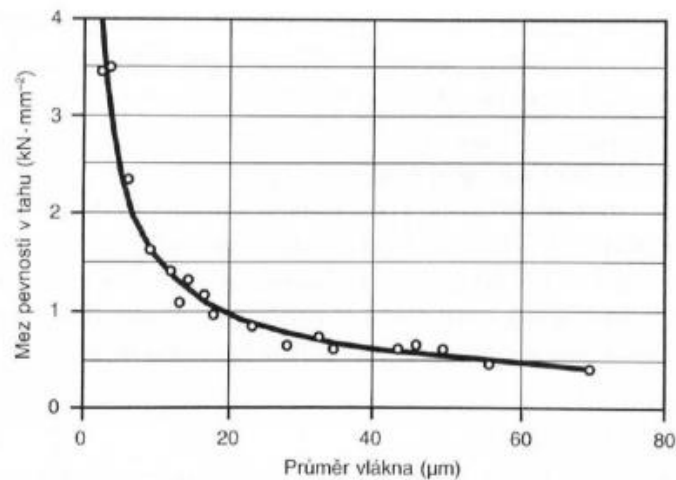
Kompozitný materiál ako celok môže prevziať napätie, ktoré by jeho slabšiu zložku porušilo. Od pevnejšej zložky kompozitu môže prevziať vyšší podiel jej teoretickej pevnosti, než by bola namáhaná samostatne [4].

Pre kompozitný materiál je charakteristický takzvaný synergický efekt. Čo znamená že pomerný súčet vlastností je menší, ako sú skutočné vlastnosti. Pri výrobe sa snažíme doceliť najvyššieho synergického efektu [1].

1.2.3 Paradox vláknitej štruktúry

Materiál vo forme vlákna má mnohonásobne vyššiu pevnosť ako rovnaký materiál v kompaktnnej forme. Čím je vlákno tenšie tým je jeho pevnosť vyššia [4].

Tento paradox sa dá vysvetliť kryštalizáciou a orientáciou kryštálov v smere osy vlákna. Ďalšia vlastnosť ktorá funguje, že čím je priemer vlákna menší tým je jeho pevnosť väčšia. V praxi sa najčastejšie používajú vlákna s priemerom 14 μm . Menšie priemery by už mohli vnikat' do pľúc a byť karcinogénne [4].



Obr. 3: Vplyv priemeru skleneného vlákna na pevnosť [4].

1.2.4 Paradox zaťaženia dĺžky

Čím kratšia je zaťažovaná časť jednotlivého vlákna, tým vyššia je jeho pevnosť. Pevnosť vlákna klesá s jeho zaťažovanou dĺžkou. To sa dá vysvetliť tým, že na väčšej vzdialenosti vlákna sa vyskytuje aj viac porúch. Podobná myšlienka by sa dala aplikovať aj na priemer vlákna. Môžeme teda povedať, že čím bude vlákno kratšie a tenšie tým menej chýb bude obsahovať a tým bude jeho pevnosť väčšia [4].

1.3 Polymérne kompozitné materiály

Tento typ kompozitov je z hľadiska výroby najpoužívanejší. Matrica je tvorená polymérom, vystuženým v prevažnej väčšine skleným vláknom. V menšom množstve sa používajú uhlíkové, aramidové a ľanové vlákna. Výhodou je nízka hmotnosť (konštrukcia lietadiel) avšak medzi nevýhody patrí nízka stabilita polymérov. Najvýznamnejšie sú matrice z reaktoplastov (polyesterové a epoxidové živice) [3].

1.3.1 Vlastnosti polymérnych kompozitov

Polymérne kompozitné materiály synergicky prepojujú pevnosť ktorú sprostredkováva výstuž a húževnatosť s pružnosťou ktorú im ponúka matrica. Vo výsledku tak vzniká materiál, ktorý má lepšie mechanické vlastnosti než komponenty z ktorých bol vytvorený. Dôležitá je tvorba medzivrstvy ovplyvňujúca konečnú štruktúru hotového kompozitu. V prípade, že medzifáza nie je súdržná, dochádza k pevnému zomknutiu dvoch fáz s štruktúrou kompozitu sa degraduje. Objemový zlomok výstuže vyplýva z výrobného procesu, ktorý bol použitý pre kombináciu vlákien s matricou. Vzhľadom k odlišným hustotám matric sa v praxi viac uplatňuje objemový zlomok než zlomok hmotnosti. Objemový zlomok je definovaný ako pomer objemu vlákien k celkovému objemu kompozitu [4, 5].

Z hľadiska mechanických vlastností je výstuž omnoho odolnejšia ako matrica, a preto môžeme konštatovať, že väčší objemový zlomok v prospech výstuže prinesie omnoho lepšiu mechanickú odolnosť materiálu. Pri výrobe je taktiež dôležité dbať na optimálne rozloženie vlákien v priestore formy, dokonalé spojenie matrice a výstuže a na minimalizáciu defektov ako je napríklad vznik vzduchových bublín v procese vytvrdzovania materiálu [6].

1.3.2 Nenasýtené polyesterové živice

Ide o kondenzát diolu a dikarboxylovej kyseliny, z ktorých aspoň jedna látka obsahuje dvojnú väzbu. Finálny polymér je rozpustený v reaktívnom rozpúšťadle, najčastejšie ide o styrén. Pre naštartovanie sieťovacej reakcie sa používajú systémy iniciátorov, urýchľovačov a podmienok. Polykondenzačné reakcie sa robia v tavenine alebo roztoku. Najčastejšie suroviny sú 1,2-propylenglykol, neopentylglykol a ako kyseliny izoméry kyseliny ftalovej, fumerovej a maleinovej. Môžu sa použiť aj iné kyseliny a glykoly. Na vlastnosti živice má dôležitý vplyv polymeračný stupeň a obsah kopolymerovateľných dvojných väzieb. Viskozita je závislá na obsahu styrénu (rozpúšťadla). Obvykle sa pohybuje v rozsahu 30-50 %. Čím viac styrénu použijeme tým môže byť vytvrdená živica krehká. Ako iniciátor tvrdnutia sa používajú najčastejšie organické peroxidy. Poznáme rôzne spôsoby vytvrdzovania ako napríklad za tepla, za studena alebo pomocou UV. Na základe spôsobu vytvrdzovania volíme vhodný peroxid, na základe zvoleného peroxidu sa volí aj urýchľovač. [4, 7]

1.3.3 Epoxidové živice

Epoxidové živice sú charakteristické výskytom epoxidovej (oxiranovej) skupiny v molekule. Ich výhodou je, že v priebehu vytvrdzovanej reakcie nedochádza k odštepovaniu vedľajších produktov a dochádza len k veľmi malému polymérnemu zmršteniu, ktoré dosahuje 2 %. Tejto výhody sa pri výrobe kompozitov využíva hlavne pri výrobe veľkých dielov, kde je vďaka tejto vlastnosti minimalizované vnútorné pnutie. Navyše vynikajú dobrou adhéziou k neupraveným skleneným vláknám. Epoxidové živice majú taktiež veľmi dobrú chemickú odolnosť voči vode, roztokom kyselín a niektorým organickým rozpúšťadlám. Vďaka dobrým mechanickým a elektro izolačným vlastnostiam sa epoxidové živice používajú pri výrobe lietadiel. Najbežnejším spôsobom akým sa získava epoxidová živica je tzv. alkalická kondenzácia. [4]

1.3.4 Vynilesterové živice

Oligomerný reťazec ktorý je na konci a na začiatku modifikovaný kyselinou akrilovou. Najviac vyskytujúcou sa skupinou sú epoxyakryláty, ďalej poznáme polyesterakryláty a polyurethanakryláty. Charakteristické je že pri sieťovaní sa využíva reakcia dvojných väzieb kyseliny a reaktívneho rozpúšťadla. V praxi sa používajú ich roztoky v reaktívnom rozpúšťadle, najčastejšie 60-70 % roztoky styrénu. [4, 6]

1.3.5 Fenolické živice

Ide o živicu na základe fenolu a formaldehydu. Vyrába sa kondenzáciou rezoly alkalicky katalyzovanou pri zvyšku formaldehydu a novolaky naopak kyslo katalyzovanou pri zvyšku fenolu. Pre využitie matrice v kompozite sa používajú molekuly s malou molekulovou hmotnosťou rezoly 200-600 g mol⁻¹ novolaky 250-900 g mol⁻¹. Kvapalné rezoly vhodné na výrobu kompozitných materiálov obsahujú reaktívne methylenové skupiny, tieto skupiny sú citlivé na prítomnosť kyseliny a tepla. Pri skladovaní môžu samovoľne siet'ovať a preto sa na nich udáva dátum spotreby. Vytvrdzovanie potom prichádza s kyslou katalýzou pri zvýšenej teplote. V novolakoch sa nenachádzajú termoreaktívne skupiny a vytvrdzujú sa tak vďaka prídania urotropinu a zvýšenej teploty, urotropin sa rozkladá a spája reťazce methylenovými mostmi. Pri reakcii sa uvoľňuje amoniak. [4, 6]

1.4 Vlákňová výstuž

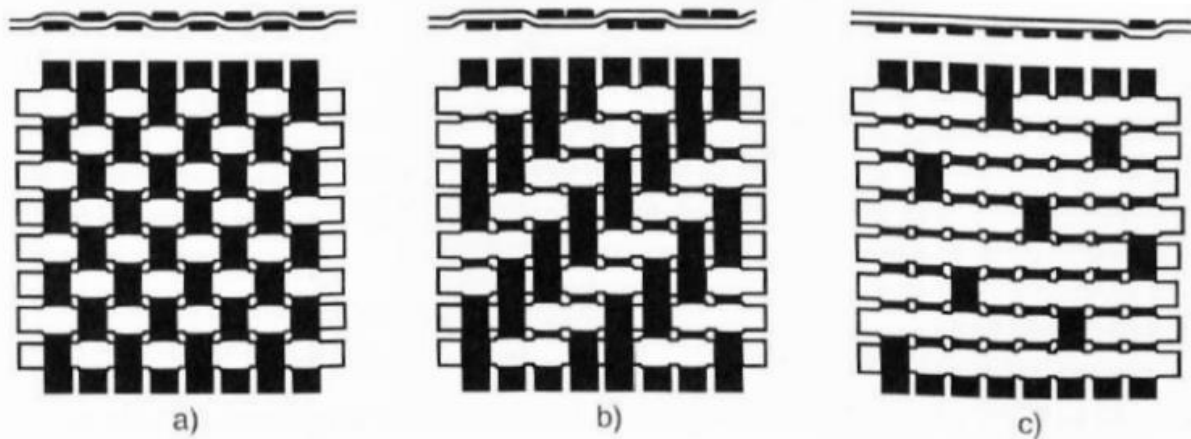
Jedná sa o fázu kompozitu, ktorá preberá vonkajšie napätie vkladané na hotový kompozitný materiál. Pre lepšiu adhéziu vlákien k matrici dochádza k povrchovým úpravám vlákien ako je napríklad silanizace. Existuje veľké množstvo obmien a variácií vlákňovej výstuže. Každý typ výstuže môže do zhotoveného kompozitného materiálu vnieť odlišné mechanické vlastnosti vyplývajúce predovšetkým z jeho štruktúry. Výber správneho materiálu je teda kľúčový k vytvoreniu kompozitu pre rôzne odvetvia priemyslu. Je nutné riadne zvážiť, akému prostrediu by mohol byť kompozit v budúcnosti vystavovaný, a ako bude mechanicky namáhaný [8].

Materiály ako je sklo alebo aramid, majú veľmi vysoké teoretické hodnoty pevnosti v ťahu a tlaku, avšak kompaktné výrobky z týchto materiálov nemajú takéto vlastnosti. Všetko je spôsobené náhodnými defektmi na ich povrchu a v objeme, ktoré spôsobia už pri menšom namáhaní deformácie kompozitu. Problém sa dá vyriešiť výmenou klasického skla za sklené vlákna, ktoré sa budú združovať do zväzkov a dokážu si uchovať mechanické vlastnosti blízke teoretickým hodnotám [9].

Najčastejšie varianty výstuže:

- Roving (prameň) – Jedná sa o rovnobežné nestočené vlákna uložené v jednom prameni. Tento prameň je prakticky základným výstupom z výroby vlákien. Pramene sa ďalej spracovávajú na ostatné typy tkanín.
- Rohož zo sekaných vlákien – Jedná sa o netkanú tkaninu z krátkych nasekaných prameňov na dĺžku 25 – 100 mm. Vlákna sú lisované do vrstiev a nastriekané spojivom a vysušené. Vzniká plst' ktorá sa navíja na rolky a je pripravená k použitiu.
- Rohož z kontinuálnych vlákien – Je podobná rohoži z krátkych vlákien, avšak vlákna sú dlhé a tým vytvorila vo vrstvách slučky, ktoré sa do seba zapletajú.
- Jednosmerné pásy – Pásy vlákien ktoré sú fixované pomocou jemných nití. V tomto type tkaniny sa nevyskytujú útky. Pri výrobe dielu da tieto pásy ukladajú vo vrstvách pod vzájomne rozličnými uhlami. Týmto spôsobom sa dá doceliť materiálu o požadovaných pevnostných charakteristikách v danom smere namáhania.
- Tkaniny – Plošné útvary z navzájom pravouhlo uložených prameňov. Pôsobí ako výstuž v oboch smeroch. Kombináciou rôznych prameňov a rôzneho počtu vlákien môžeme doceliť vyššiu pevnosť v jednom smere.

- Druhy väzieb:
 - Plátňová väzba – najjednoduchšia, manipulácia s ňou je jednoduchá, priestorová stálosť a pri delení vnika iba malý otrep.
 - Keprová väzba – má vyššiu pevnosť a tuhosť vo výslednom lamináte tento jav spôsobuje menšie zvlnenie jednotlivých prameňov, taktiež je viac ohybný ako plátňová väzba, a preto sa aj viac využíva na tvarovo zložitejšie výrobky.
 - Atlasová väzba – má ešte menšie zvlnenie, vďaka tomu je vhodná na priestorovo zložité výrobky taktiež sme schopný vďaka tejto väzbe dosiahnuť veľmi hladký povrch.
 - Jednosmerná tkanina – obsahuje vlákna v jednom smere a útky, ktoré slúžia na fixáciu vlákien v osnove sú tvorené iba malým podielom vlákien oproti osnove, táto tkanina je vhodná pre výrobky namáhané iba v jednom smere.
 - Zmiešaná tkanina – osnova a útky sú z iného materiálu.
 - Hybridná tkanina – používa sa kombinácia rôznych druhov vlákien pre ich dobré vlastnosti. [4]



Druhy väzieb: a) plátňová väzba, b) keprová väzba, c) atlasová väzba

Obr. 4: Druhy plátňových väzieb [4].

1.5 Typy vláknovej výstuže

Celosvetovo najpoužívanejším typom výstuže kompozitných materiálov sú sklenené vlákna, ktoré tvoria až 90 % celosvetovej produkcie kompozitov. Ďalšie používané vlákna môžu byť prírodné, aramidové, uhlíkové atď. Pokiaľ je do výstuže použitých viacej vlákien rôznych typov, jedná sa o hybridný kompozitný materiál. Rozhodujúcimi vlastnosťami vláknovej výstuže sú Youngov model pružnosti, hustota vlákien a pevnosť v ťahu [2]. Vlastnosti vybraných typov vlákien sú uvedené v tabuľke 1.

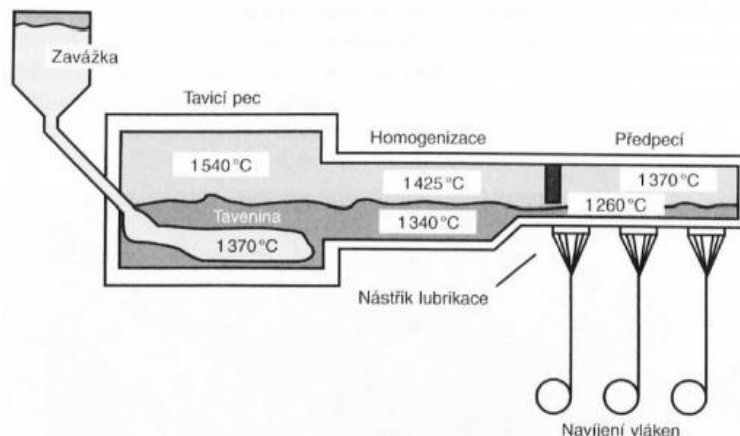
Tab. 1 Prehľad vlastností niektorých typov vlákien [5].

Typ vlákien	Hustota [g/cm ³]	Modul pružnosti v ťahu [GPa]	Pevnosť v ťahu [GPa]	Maximálna deformácia [%]
Sklenené (E-sklo)	2,56	76	2,0	2,6
Uhlíkové - vysokomodulové	1,95	380	2,4	0,6
Uhlíkové – vysokopevnostné	1,75	230	3,4	1,1
Aramidové (Kevlar™ 49)	1,45	130	3,0	2,3
Polyetylenové (PE Spectra™)	0,97	172	3,0	1,7

1.5.1 Sklenené vlákna

V procesoch výroby kompozitov tieto vlákna dominujú vďaka veľmi dobrým technickým vlastnostiam, ako sú, ako sú Youngov model pružnosti v ťahu a vysoká pevnosť. Sklenené vlákna sú taktiež odolné proti vysokým teplotám, majú elektrické vlastnosti, sú nehorľavé a majú dobrú chemickú odolnosť. Pre svoje dobré tepelné a zvukovo-izolačné vlastnosti nachádzajú uplatnenie aj v stavebnom priemysle [10].

Sklenené vlákna sa vyrábajú zvlákňovaním z taveniny SiO₂ a ďalších oxidov. Najčastejšími sú oxidy AL, CA, MG, B s malým zastúpením alkalických kovov Na a K. Po pretlačení taveniny cez zvlákňovaciu hlavu nastáva predlžovanie vlákien na finálny rozmer. Pri predlžovaní dochádza až k 40 000 násobnému predĺženiu a zmenšeniu priemeru z 2 mm na 10-14 μm. Predlžovanie funguje pomocou veľmi rýchleho odtiahnutia a navíjania na cievku. Rýchlosť odtiahnutia je až 50 ms⁻¹. Popri navíjaní sa vytvárajú pramene. Vlákna sa v prameni správajú abrazívne, kvôli tomu sa vlákna lubrikujú. Po lubrikácii a vytvorení jednotlivých prameňov sa pramene navinú na cievku odkiaľ sa prevážajú k ďalšiemu spracovaniu [4, 11, 12].



Obr. 5: Zvlákňovanie skla [4].

1.5.2 Prírodné vlákna

Prírodné vlákna sú organické rastlinné vlákna, ktoré je sa dajú získať zo stonky rastlín. Môže sa jednať o rastliny exotického pôvodu (ananás, kokos, abaka alebo bambus) taktiež sa môže jednať o rastliny pestované v miernom podnebí (juta, konope alebo ľan). Mimo textilný priemysel sa tieto vlákna využívajú aj vo výrobe biodegradovateľných kompozitov. Prírodné organické vlákna môžu byť aj živočíšneho pôvodu napríklad vlna alebo hodváb [4].

Prednosti prírodného vlákna:

- nízka hmotnosť,
- malá abrazivita pri mechanickom opracovaní,
- výhodná likvidácia spaľovaním,

Nevýhody prírodného vlákna:

- závislosť vlastností vlákien na podmienkach ich rastu,
- citlivosť na pôsobenie vlhkosti,
- obmedzená voľba matrice vzhľadom k rozkladu vlákien pri vysokej teplote spracovania (odolné do 200 °C),
- obmedzená dĺžka vlákien,

Tab. 2 Porovnanie mechanických vlastností prírodných a sklenených vlákien [4].

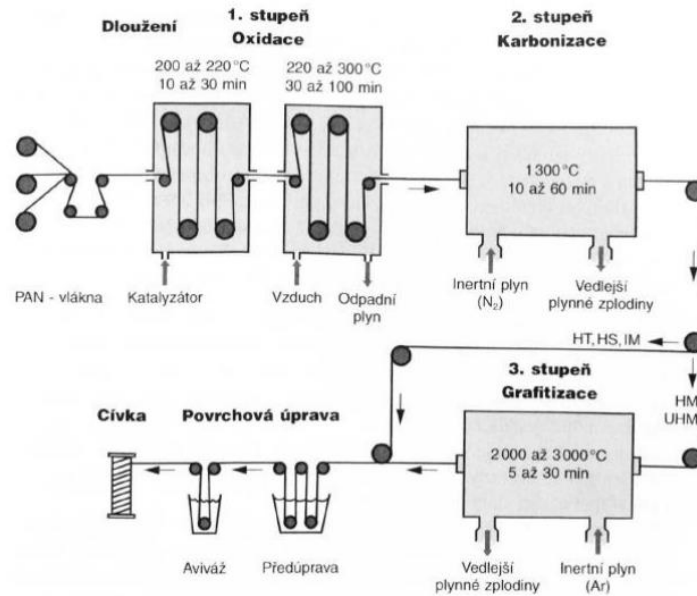
Typ vlákien	Hustota [g/cm ³]	Modul pružnosti v ťahu [GPa]	Pevnosť v ťahu [GPa]	Maximálna deformácia [%]
Sklené vlákno E	2,54	75	3,5	4
Konope	1,45	70	0,6	1,6
Ľan	1,48	30	0,75	2,0
Juta	1,4	55	0,55	2,0
Sisal	1,45	20	0,6	2,0

1.5.3 Uhlíkové vlákna

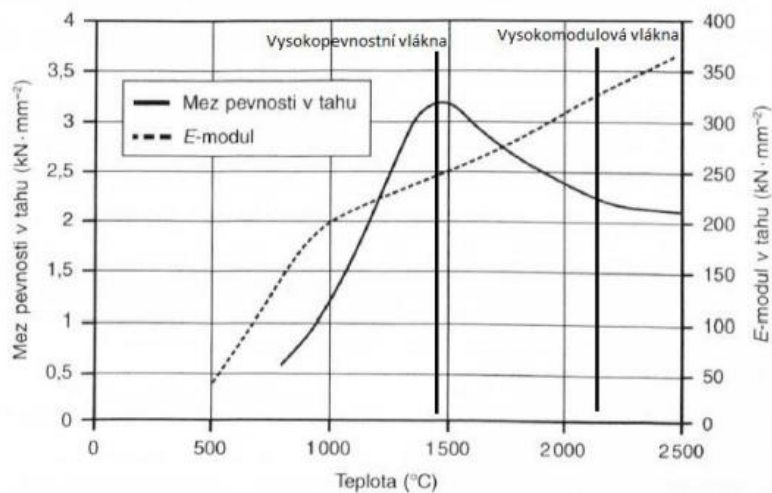
Jedná sa o najpevnejšie dlhé vlákna. Majú extrémne vysokú pevnosť, pričom majú veľmi malú rozťažnosť. Uhlíkové vlákna obsahujú kryštalickú štruktúru grafitu s kryštálmi, ktoré sú orientované paralelne k dlhej osi vlákna. Tento typ vlákna je známy svojou vysokou pevnosťou, tepelnou odolnosťou, nízkou mernou hmotnosťou a dobrou a dobrou elektrickou vodivosťou. Uhlíkové vlákna majú obvykle priemer 5–10 μm. V štruktúre sa uplatňujú kovalentné väzby. [4, 5, 10]

Najpoužívanejší spôsob výroby uhlíkových vlákien :

- Polyakrylonitril (PAN) je najprv dĺžený k dosiahnutiu čo najväčšej orientácie molekúl v smere osi vlákna. Nasleduje prvý stupeň a to stabilizácia pri ktorej sú vlákna zohrievané na 200 až 300 °C. Pri tom sa PAN dehydratuje a premení v dôsledku cyklizácie nitrilových skupín na rebríkový polymér. Druhý stupeň je karbonizácia ktorá prebieha v inertnej atmosfére pri teplote 1000 až 1500 °C. V treťom stupni prebieha grafitizácia v inertnej atmosfére pri teplote 2000 až 3000 °C. Po celej procedúre nasleduje povrchová úprava a navíjanie na cievky.



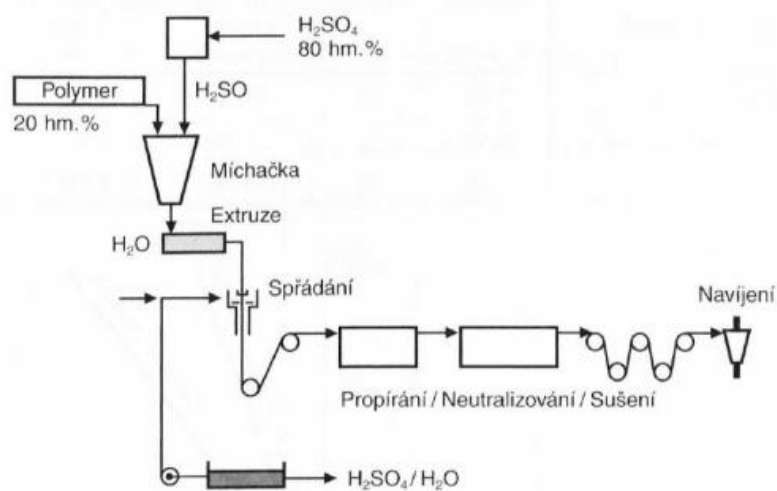
Obr. 6: Výroba uhlíkového vlákna z PAN [4].



Obr. 7: Vplyv teploty zapracovania uhlíkového vlákna na medzu pevnosti v ťahu a modul pružnosti.

1.5.4 Aramidové vlákna

Aramidové vlákna sú skráteneý názov pre vlákna vyrobené z aromatických polyamidov. Majú vysokú pevnosť, vysokým modulom pružnosti v ťahu, nízkou mernou hmotnosťou a žiaruvzdornosťou. Nevýhoda tohto materiálu spočíva v jeho náchylnosti a citlivosti na UV žiarenie a vlhkosť. Výroba aramidových vlákien spočíva v zvlákňovaní z kvapalného roztoku, čo je možné vďaka iónovej zložky (chlorid vápenatý). Ďalšou dôležitou zložkou je taktiež voľba organického rozpúšťadla. Aramidové vlákna môžu nájsť uplatnenie vo výrobe ochranných odevov a heliem, ako náhrada azbestu alebo pre výrobu káblov [5, 10].



Obr. 8: Zvlákňovanie aramidov [4].

Najznámejší aramid je Kevlar (je to obchodný názov firmy Du Pont) chemicky poly-para-fenyltereftalamid a ďalší je Nomex (Du Pont) chemicky poly-metha-fenylizoftalamidu. Poznáme viacej druhov Kevlaru, odlišujú sa číslaním [11].

1.6 Porovnanie vlákien

Vlastností vlákien môžeme porovnať z deformačného chovania jednosmerne vystužených laminátov, namáhaných rastúcim ťahovým namáhaním v smere výstuže [4].

Tab. 3 Porovnanie vlastností vybraných druhov vlákien.

Typ vlákien	Hustota [g/cm ³]	Modul pružnosti v ťahu [GPa]	Pevnosť v ťahu [GPa]
Sklenené vlákno E	2,56	76	3,5-4,6
Konope	1,45	70	0,6
Kevlar 29	1,44	80-146	3,6
Štandardné uhlíkové vlákno	1,8	230-400	3,5-5

Tab. 4 Všeobecné porovnanie niektorých vlastností kompozitov.

Vlastnosti	Kompozit so skleným vláknom	Kompozit s aramidovým vláknom	Kompozit s uhlíkovým vláknom
Hustota	+-	++	+
Medza pevnosti	+	+	+
E-modul	-	+	++
Medza pevnosti v tlaku	+	-	+
Rázová húževnatosť	+	+	-
Tlmenie	-	+	-
Chovanie v statickom a dynamickom namáhaní	+	+	++
Dielektrické vlastnosti	++	++	-
Adhézia	++	-	+
Nasiakavosť	+	-	+
Cena	++	+-	-

1.7 Úprava vlákien

Pre najoptimálnejšie vlastnosti kompozitnou je dôležitý prenos sily medzi vláknom a matricou. Matrice sú odlišného chemického zloženia ako vystužujúce vlákna a preto sa používajú latky, ktoré zlepšujú spojenie medzi matricou a vláknami. Tohto javu sa dosahuje pomocou pred úpravy vlákien pomocou takzvanej pretutury. [4]

1.7.1 Organosilany

Využívajú sa na zlepšenie povrchových vlastností sklenených vlákien. Tento jav funguje na základe silanu, ktorý obsahuje reaktívnu skupinu a alkoxylovú skupinu. Na povrchu vlákien sa nachádza prebytočná vlhkosť ktorá reaguje s alkoxylovou skupinou a vzniká alkohol a silanol. Silanol sa následne vďaka skupiny HO- viaže na povrch skla vodíkovými mostmi. Pre výsledné spojenie vlákna so silanom a matrice sa využívajú reaktívne skupiny ktoré sú reaktívne s oxironovým kruhom v epoxidovej živici. Táto reakcia zabezpečuje pevnú väzbu medzi týmito zložkami. [4, 13]

1.7.2 Spreading

Jedná sa o mechanickú úpravu prameňov vlákien. Pri tejto úprave dochádza k rozšíreniu a následne zúženiu prameňa. Úprava prebieha pomocou prúdenia vzduchu cez prameň vlákna. Takto upravený prameň je potom vhodne použitý pri výrobe tkaniny. [14]

1.7.3 Úpravy uhlíkových vlákien

Povrch uhlíkových vlákien obsahuje dostatočné množstvo reaktívnych skupín, ktoré tu zostávajú po výrobe. Najčastejšie sa nanáša vrstva obsahujúca epoxidy, ktorá uľahčuje prácu s vláknom pri výrobe tkaniny a iných textilných výrobkov. Pre zlepšenie povrchových vlastností sa môže využiť oxidácia alebo plazmatická úprava. Tieto úpravy zvyšujú podiel polárnych skupín a tým zlepšujú zmáčavosť povrchu. [4, 13]

1.7.4 Úpravy aramidových vláken

Najčastejšie sa pri tomto type vláken používajú prostriedky na zlepšenie adhézie povrchu. Vláknó samo o sebe je dostatočne polárne, takže pri výrobe dochádza k veľmi dobrému zmáčaniu povrchu matricou, tým pádom dochádza ku kvalitnému spojeniu vlákna a matrice. Problém spojenia aramidového vlákna a matrice môže byť lubrikácia ktorú je nutné použiť pri spracovaní vlákna do tkaniny. Tento lubrikant sa dá odstrániť praním. Tento proces sa využíva hlavne pri veľmi presných a namáhaných výrobkoch najmä v leteectve alebo armáde. [4]

1.8 Vákuová infúzia

Infúzne metódy sú založené na princípe, že existuje tlak medzi prívodom živice a vákuovým vakom (dutinou). Hlavným rozdielom medzi infúziou a vstrekaním je konštrukcia formy. Resin Transfer Moulding (RTM) si vyžaduje pevné polovice formy, aby vydržali vstrekovací tlak, ktorý je vyšší ako tlak okolia. Naproti tomu pri infúzii je časť formy nahradená pružnou fóliou a tlak v dutine je nižší ako tlak okolia. [15]

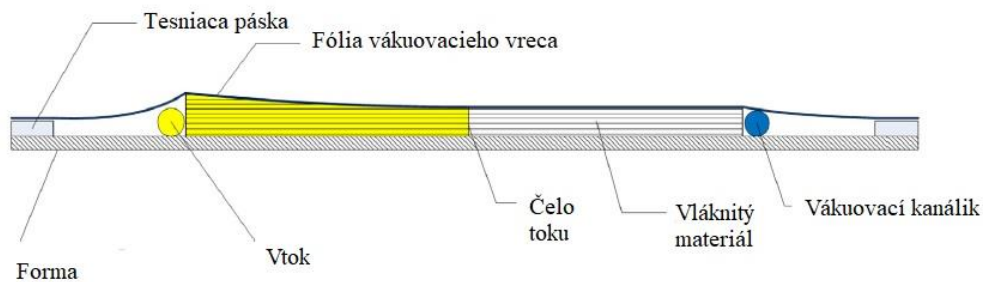
Ak je forma RTM, ktorá sa skladá z dvoch pevných polovic formy, vákuovo tesná, môže sa vykonať aj infúzia. V literatúre sa často uvádza, že živica sa nasáva do dutiny. Toto tvrdenie je hovorovým opisom infúzie ale z vedeckého hľadiska nie je pravdivé. Tlak medzi zásobníkom živice a dutinou je hnacou silou pri priesaku živice. Podobne ako teplota, aj tlak je termodynamická stavová veličina. Všetky stavové premenné majú spoločné to, že tok je od veľkého po malý, a preto nie je živica nasávaná do dutiny naopak, živica je vtlačaná do dutiny bez ohľadu na to, či je RTM alebo infúzny proces. [15]

1.8.1 Všeobecný popis vákuových infúzných techník

Základné kroky impregnácie suchého a nenasýteného vláknitého materiálu sú rovnaké pre všetky spôsoby impregnácie. Prvým krokom je príprava formy nanosením uvoľňovacieho média alebo použitím uvoľňovacej fólie. Je to potrebné, aby sa kompozitná časť po vytvrdnutí mohla jednoducho odformovať. V ďalšom kroku sa vláknitý materiál umiestni na pripravenú formu. To sa môže vykonať buď po vrstvách, alebo vo vopred pripravených balíkoch vrstiev (platniach). Ak sa použije metóda infúzie kvôli impregnácii sa táto štruktúra prekryje vrstvou uvoľňovacej tkaniny a vzduchotesne sa utesní vákuovou fóliou a tesniacou páskou. Oddel'ovacia vrstva zabezpečuje, že fólia z vákuového vreca a živicové kanáliky sa dajú oddeliť od dielu po infúzii a vytvrdnutí živice. V prípade procesu RTM sa použije jedna časť formy, druhá časť formy sa nahradí vákuovou fóliou a tesnením ktoré slúži na uzavretie formy vyplnenej vláknom [16].

Keďže vláknový materiál je utesnený fóliou vákuového vreca a forma je odvzdušnená, hrúbka polotovaru sa mení v dôsledku tlakového rozdielu. Keď sa živica vtlačí do dutiny pomocou okolitého tlaku, tlak v dutine sa zvyšuje. Toto zvýšenie tlaku závisí od polohy čelného toku živice a spôsobuje uvoľnenie materiálu vláken. Preto je hrúbka vláknového materiálu zvýšená. V závislosti od súčiastky môže byť umiestnených niekoľko vtokových kanálov, aby sa kontrolovalo čelo toku. Toto umiestnenie je buď na základe empirických hodnôt, alebo sa odhaduje pomocou simulácie toku. Tu sa určia možné cesty prúdenia živice, ako aj sútok živice ovplyvňuje usporiadanie kanálov [17].

Existuje rozdiel medzi kompresným a relaxačným správaním vláknových materiálov. Hrúbka polotovaru sa znižuje počas cyklického zaťažovania a uvoľňovania vláknového materiálu. V prípade impregnovaných vláknových materiálov je koeficient trenia nižší, a preto sa správanie pri stláčaní líši od správania suchých vláknových materiálov. To znamená, že v prípade impregnovaných vláknových materiálov je potrebný nižší tlak na dosiahnutie rovnakej hrúbky ako v prípade suchých vláknitých materiálov [18].



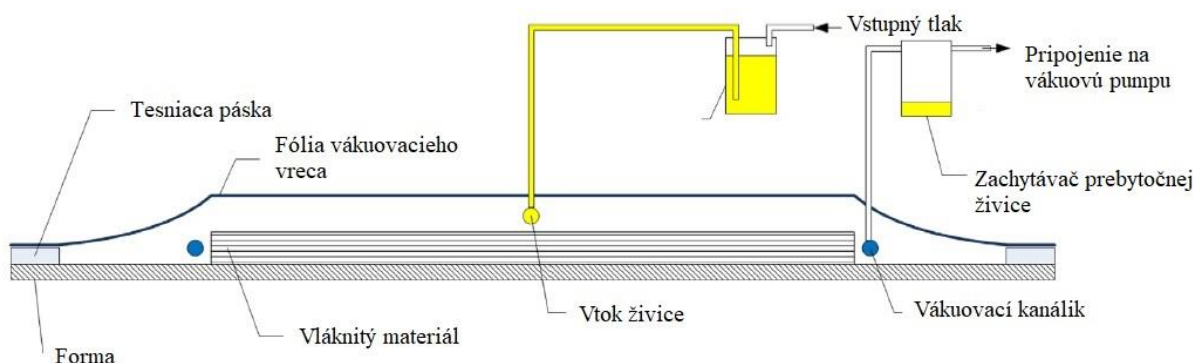
Obr. 9: Zmena hrúbky v dôsledku rozdielu tlaku počas vákuovej infúzie [18].

1.8.2 Infúzne metódy

V roku 1982 si postup podobný Marcovej metóde patentoval aj Le Comte. Tento proces je známy ako Vacuum Assisted Injection Moulding (VAIM) a umožňuje výrobu tenkostenných veľkých konštrukcií, ako sú napríklad trupy lodí [16].

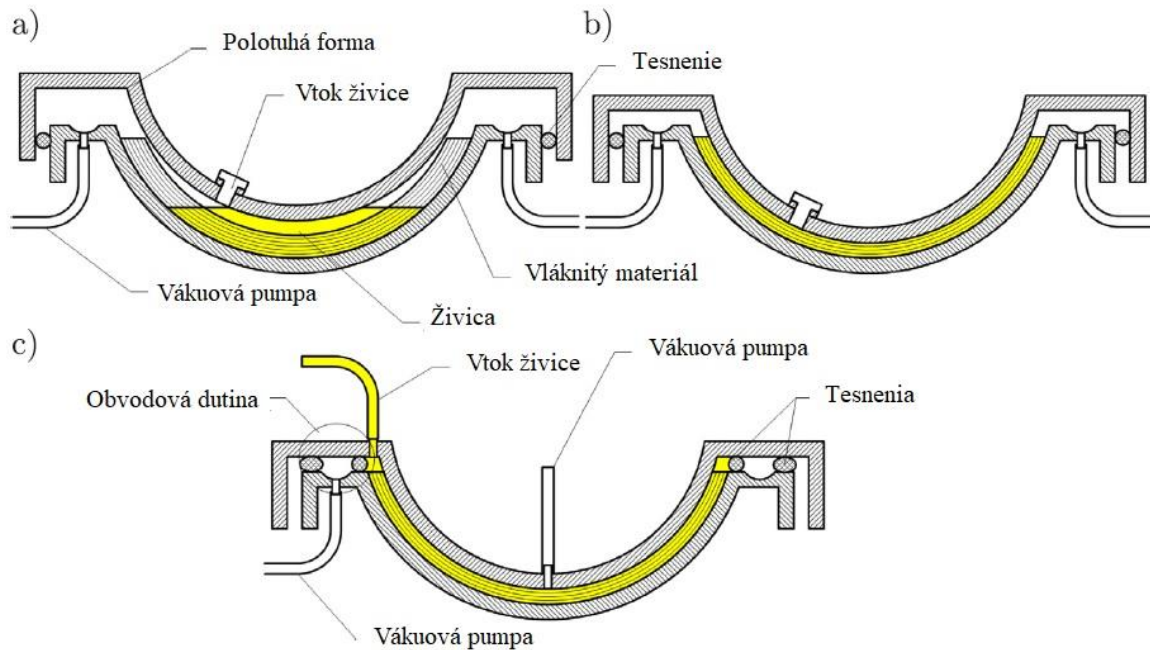
Najväčší zmätok medzi impregnačnými procesmi prevláda v známom Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding (VARTM). Summerscales napríklad uvádza, že v procese VARTM je tok živice v rovine (typ I RIFT) vrstiev, aspoň v Spojených štátoch je táto definícia populárna. V literatúre možno nájsť aj termín Vacuum Assisted Resin Infusion Moulding (VARIM). Z opisu postupu vyplýva, že postup zodpovedá procesu VARTM [19].

V roku 1963 Philip Green (English Electric Company) patentoval metódu vákuovej infúzie. Opis sa hodí na metódu VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding), pretože sa používa v mnohých publikáciách, ale skratka sa v patente neuvádza. Ako je vidieť na obr. 10, suchý vláknitý materiál sa umiestni na formu a utesní sa pružnou fóliou z vákuového vrečka. Pri impregnácii sa priestor medzi fóliou a formou odsáva vákuovou pumpou. Po otvorení vstupného ventilu prúdi živica zo zásobníka živice do dutiny a impregnuje vláknitý materiál. Prúdenie sa zastaví, keď živica naplní zachytávač prebytočnej živice. Ako možnosť sa uvádza, že živica môže byť pod tlakom, aby sa zvýšil jej tok, ale nie je to potrebné. [20]



Obr. 10: Schematický náčrt metódy VARTM [20].

Už z krátkého opisu literárneho výskumu postupu VARTM vyplýva, že tento termín sa používa pre rôzne postupy a v jednotlivých krajinách sa interpretuje rôzne. Ako vidieť z obr. 11, na impregnáciu suchého vlákňitého materiálu sa používajú dve polotuhé polovice formy. Pred impregnáciou sa suchý vlákňitý materiál umiestni medzi formy a do dutiny sa naplní odmerané množstvo živice (časť obrázka a). Následne sa dutina vyprázdni, a preto sa horná polovica formy stlačí smerom nadol (časť obrázka b). Tento pohyb núti živicu impregnovat' suchý vlákňitý materiál [21].



Obr. 11: Schematický nákres metódy VARI (a,b) a metódy LRTM (c). [21]

1.8.3 Zhrnutie infúzných procesov

Tab. 5 Zhrnutie infúzných techník ich pôvod a základná charakteristika. [21]

Názov procesu	Pôvod technológie	Aplikácia	Hlavná charakteristika
Metóda Marco	Marco Chemicals		Polotuhé formy, živica pod tlakom
Crystalic VI	Scott Bader		Pružná polovica formy
VAIM	Le Comte-Holland BV	Trupy lodí	Rovnaké ako metóda Marco a Crystalic VI
VARTM/VARIM		Pancier	Pružná polovica formy, forma je odvzdušnená
VARI/VRIM	Lotus Cars	Časti automobilov	Polotuhé formy, forma je odvzdušnená
RTM Light	Magnum Venus Pastech	Námorné diely	Vákuum sa používa na uzatváranie polotuhých foriem
DP-RTM	DLR		Diferenčný tlak ovplyvňuje FVC

CCBM	Arctek Inc.		Plochá doska sa používa na utesnenie
LPRIM	Le Comte-Holland BV	Trupy lodí	Penové pásy používané na distribúciu živice
DRDF/RIDFT	K.J. Channer		Dve časti pružnej formy
RIRM	Structural Composites	Lodné kormidlá, bazénové nádrže, kajaky, komponenty nákladných vozidiel a autobusov	Živica prúdi v cykle
SLI	DLR	Ochranné kryty Do328	Používa sa jedna trubka na odvodu živice
VADPI	DLR		Distribučné kanály sa používajú mimo dutiny
SCRIMP	TPI	Lopatky rotorov, trupy lodí	Pletené alebo tkané prietokové médium
HyPer VARTM	V Systems Composites	Paluba na prednom pylóne CH47, reflektor pre pásmo Ka	Vysoko priepustný prieduch ako prietokové médium
A-VARTM	MHI	Plánované pre vertikálny stabilizátor MRJ	Stlačenie predlisku pred infúziou
VRIP	McDonall Douglas		Reliéfna fólia na vákuové vrecká
VIMP	D. Loving	Strechy traktorov, blatníky zadných kolies	Impregnácia zvnútra dielu
VAP	EADS	Kryty krídiel, prepážka, panely trupu	Polopriepustná membrána
IRIS	Spirit Aerosystem	Kryty krídiel	Prietokové médium je umiestnené v dutine nástroja
CAPRI	Boein	Pohyblivá odtoková hrana B787	Prívod živice je vyprázdnený
MVI	Eurocopter France		Lapač živice a zásobník živice sú spojené cez vákuovú trubicu na konci infúzie
PI			Používanie tlakového rozvodného média
RTI	Short Brother	Kryt krídla Bombardier C Series (A220)	Obalová vrstva s vystuženými a mäkkými oblasťami, tlak v autokláve na zvýšenie FVC
VIPR/FFC	University of Delaware		Pripojiteľná vákuová komora
CARTM	E.J. Lang, R.W. Rydin		Rozdielny tlak medzi dutým kanálom a dutinou aktivuje kanál
FASTRAC	USA Secretary of Army		Opakovane použiteľné prietokové médium
DBVI	Boeing		Použitie druhej fólie vákuového vreca

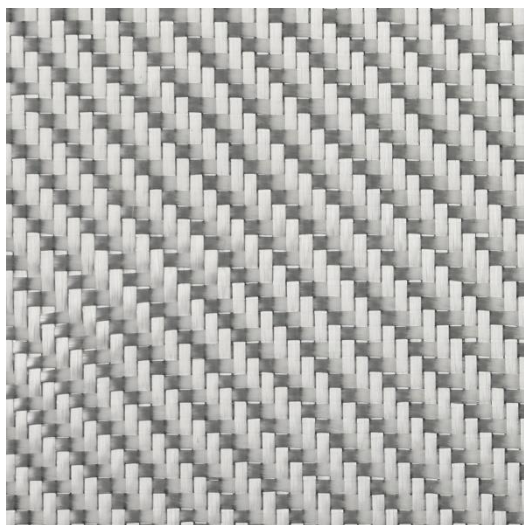
2 PRAKTICKÁ ČASŤ

2.1 Kompozitné vzorky

2.1.1 Použité Tkaniny

Na výrobu vzoriek boli použité nasledujúce tkaniny:

- Uhlíkové vlákno s textúrou twill
- Sklené vlákno s textúrou bi-axial
- Sklené vlákno s textúrou twill
- Ľan s textúrou twill
- Ľan s textúrou bi-axial



Obr. 14: Sklené vlákno s textúrou twill.



Obr. 15: Sklené vlákno s textúrou bi-axial.

Tab. 6 Základné hodnoty použitých látok.

Typ vlákien	Hmotnosť [g]	Objem [cm ³]	Hustota [g/m ²]
Uhlíkové vlákno - twill	3,79	0,01	379
Sklené vlákno – bi-axiál	2,52	0,01	252
Sklené vlákno – twill	1,76	0,01	176
Uhlík-ľan	3,75	0,01	375
Ľan – bi-axiál	1,92	0,01	192
Ľan - twill	2,0	0,01	200

2.1.2 Použitá živica

Bola použitá laminačná živica LG 700 a tužidlo HG 700, tento systém je na základe epoxidovej živice. Živica LG 700 je veľmi tekutá živica so zvýšenou reaktivitou, vyznačuje sa mimoriadnou flexibilitou a vysokou tepelnou odolnosťou. Živica obsahuje modifikačné činidlá ktoré maximalizujú prienik laminačnej zmesi do tkaniny. Tužidlo HG 700 je tekuté a preto je vhodné na infúziu aj tých najtenších materiálov. Pomer miešania živice a tužidla je v pomere 100 : 30 na základe váhy, takže som zmiešal 100g živice s 30g tužidla.

Tab. 7 Základné hodnoty použitých látok.

	LG 700	HG 700
Hustota [g/cm ³]	1,18 - 1,23	0,94
Viskozita [mPa*s]	500 - 700	15 - 20
Ekvivalent epoxidu [mol/kg]	156 - 165	-
Index epoxidu [-]	0,60 - 0,64	-
Vodíkový ekvivalent [-]	-	48
Farba [-]	max 3	max 3
Viskozita zmesi [mPa*s]	-	245 - 249

2.1.3 Výroba vzoriek

Vzorky boli vyrobené v laboratóriu v škole pri použití technológie vákuovej infúzie. Postup výroby je nasledovný:

1. Príprava formy
2. Delenie materiálu
3. Príprava rozvodného systému
4. Uzavretie vákuovej formy
5. Príprava živice
6. Vákuová infúzia

1. Najskôr bola vyčistená tabuľa skla s acetónom, ktorá bola použitá ako forma pre výrobu rovných vzoriek. Následne boli papierovou páskou oblepené zhruba 2cm od kraju z dôvodu, že na toto miesto ktoré je zalepené sa lepí tesnenie, ak by som nepoužil túto pásku tak tesnenie nebude držať na navoskovanej tabuli skla. Na vyčistené a zalepené sklo bola nanesená pomocou handričky krúživým pohybom vosková fáza Oskar 700 ktorý zabezpečí jednoduchšie oddelenie vyrobeného vzorku od formy.

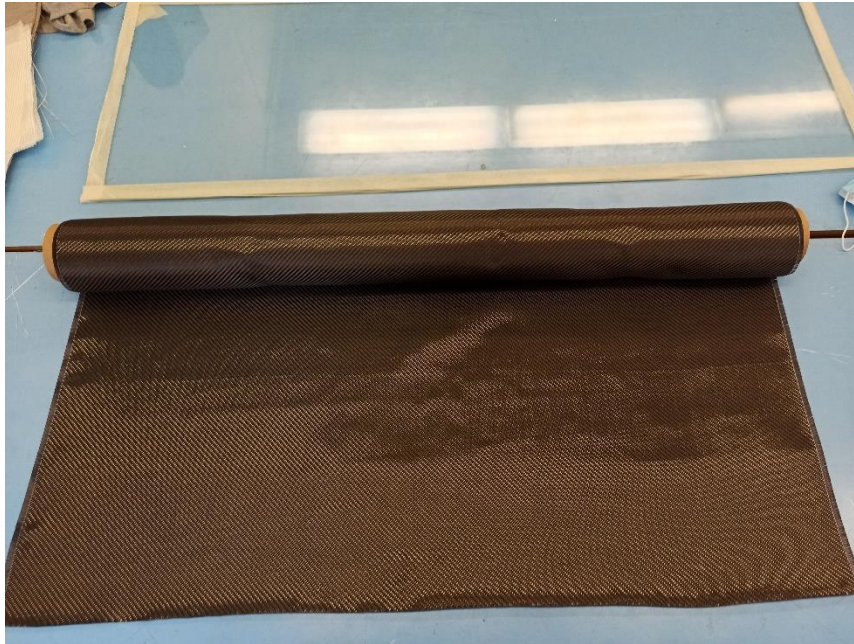


Obr. 16: Sklenená tabuľa ktorá slúži ako forma oblepená papierovou páskou.



Obr. 17: Nanášanie vosku na tabuľu skla.

2. Po nanesení vosku bolo pokračované s delením látky na potrebné rozmery, látku bola delená nožničkami alebo s nožíkom s rotačnou čepeľou. Nastrihané štvorčeky látky boli poukladané na navoskované sklo podľa predlohy a otáčané podľa predlohy aby nevznikala izotropia.



Obr. 18: Látka z uhlíkového vlákna pripravená na delenie.

3. Na vrch látkových vzoriek bol pridaný jeden kus látky ktorá slúži na konštantný rozvod živice po celom vzorku táto látka má v mojom pokuse zelenú farbu na fotkách je jednoducho identifikovateľná, pod túto látku bola umiestnený jeden kus fólie ktorý slúži na oddelenie vzorku od látky ktorá slúži na rozvádzanie živice. Ak sú všetky látky umiestnené na svojom mieste boli odrezané 2 kusy hadice jedna slúži na prívod živice k vzorku táto hadička ústi do trubky ktorá slúži na pravidelný rozvod živice do všetkých vzoriek, táto trubka má otvor v tvare šróbovice po celej dĺžke, okolo tejto trubky bola obmotaná zelená látka ktorá slúži na lepšie rozvádzania živice do vzorku. Druhá trubka bola pripojená do takej istej trubky ktorá bola použitá na rozvádzanie živice, v tomto prípade bude plniť funkciu odsávania prebytočnej živice zo vzorku, druhú stranu trubky pripojím k vzdušníku.



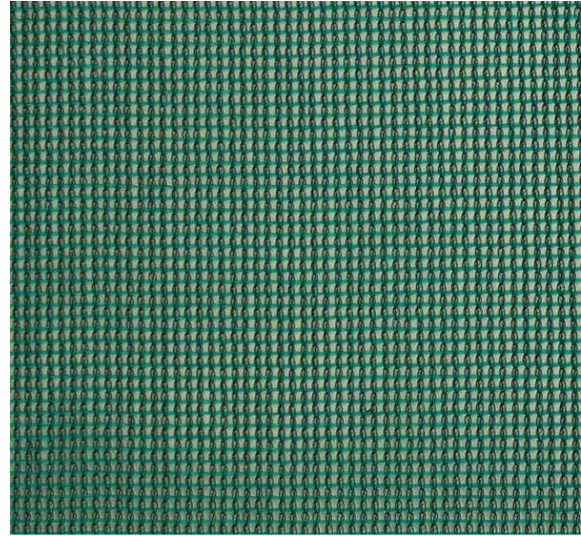
Obr. 19: Trubka na rozvod živice vo forme.



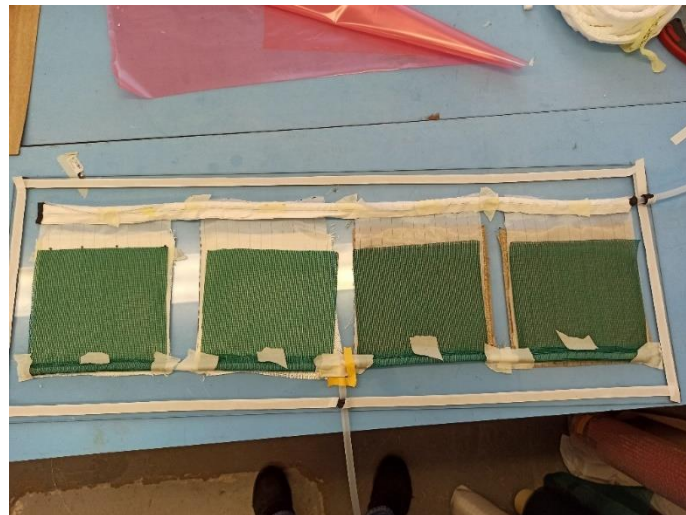
Obr. 20: Trubka na prívod živice do formy.



Obr. 21: Látka použitá na oddelenie rozvodného systému od vzorku.



Obr. 22: Látka použitá na rovnomerný rozvod živice do vzorku.



Obr. 23: Vzorky pripravené na uzavretie fóliou a následné vákuovanie.

4. Následne bola odlepená páska zo skla a na miesto kde bola papierová páska nalepím butylovú pásku ktorá má na vrchnej strane ochrannú pásku ktorá bude odlepená až keď sa bude forma zatvárať plastovým vreckom na vákuovanie. Odstrihne sa dostatočne veľký kus fólie ktorý sa použije na uzavretie formy a vytvorenie vákua. Postupne sa začne z tesnenia odlepovať ochranná páska a fólia sa bude lepiť a pritláčať na tesnenie. Keď je celá fólia dostatočne utesnená, tak trubku ktorá slúži na prívod živice zalomím a stlačím aby mohlo vo forme vzniknúť vákuum. Ak je forma správne utesnená treba skontrolovať sluchom či je forma tesná a nevniká vzduch do formy, taktiež treba použiť manometer na meranie vákua (maximálna strata aby sme pokračovali je 0,1 bar za 15 min), ktorý slúži na zmeranie či do formy nevniká cez tesnenie nejaký vzduch čo nie je žiadúce. Ďalší spôsob ktorým sa zisťuje tesnosť formy je že silou sa potiahne za fóliu a ak pod ňou vzniká vzduchová medzera tak forma netesní a vzduch sa dostáva cez tesnenie do formy, v tomto prípade treba nájsť kde vnika vzduch do formy, v tomto mieste treba skúsiť viac pritlačiť fóliu k tesneniu ak toto nepomôže treba formu pretesniť.



Obr. 24: Vzorky vo vákuu pripravené na infúziu živicom.

Na vytvorenie vákuua bola použitá výveva, avšak medzi vývevou a formou bol umiestnený vzdušník ktorý slúžil na prípadné zachytenie prebytočnej živice ktorá by mohla poškodiť vývevu.



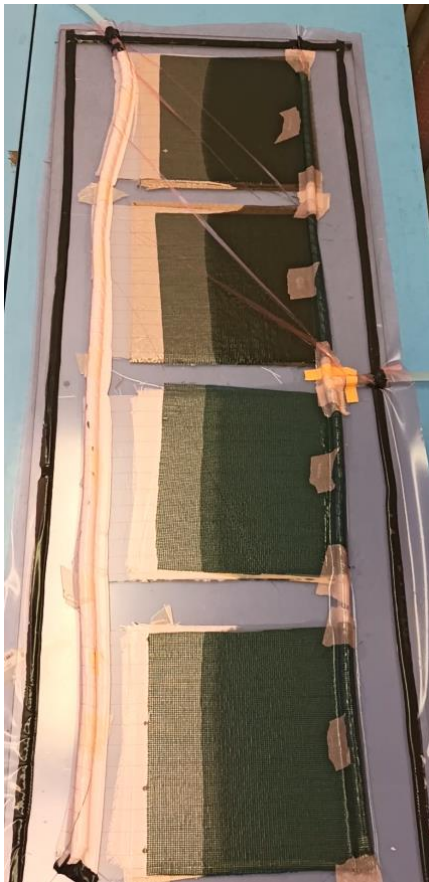
Obr. 25: Vzdušník a výveva.

5. Ak je vo forme vákuum a vzorky uložené na svojom mieste tak bol spočítaný objem živice, ktorá bude použitá na infúziu. Objem bol spočítaný ako objem hadičiek ktoré slúžia na prívod živice a k tomu pripočítam objem vzoriek. Živica bola zmiešaná v správnom pomere s tužidlom a pár minút bola zmes miešaná pre dobré premiešanie živice s tužidlom, treba pracovať rýchlo pretože živica zmiešaná s tužidlom začne po zhruba 60 minútach hustnúť a tvrdnúť, nastane exotermická reakcia a zmes sa začne zahrievať, tento jav je nežiadúci z dôvodu že potrebujeme čo najjednoduchší prienik živice do nenasýtenej látky. Správne rozmiešaná živica obsahuje veľké množstvo malých bubliniek, tieto bublinky sú nežiadúce vo finálnom výrobku preto pohár s rozmiešanou živicom bol vložený do vákuovej komory a zvyšovaním vákuu vyplávajú bubliny na hladinu.



Obr. 26: Vákuová komora použitá na odstránenie bublín zo živice.

6. Formu bola nechaná vo vákuu minimálne 30 - 60 minút pre vytvorenie skoro úplného vákuu, následne bola uvoľnená prívodová hadička ktorá bola ponorená do odmerky s roztokom živice, tak aby žiaden vzduch nevníkol do vákuovej formy. Hadička bola celý čas priškrtená a tým bol regulovaný prívod živice do formy, keď živica nasýti približne 2/3 vzorku tak prívodová hadička bola zalomená úplne a tým prerušený prívod živice do formy, pri tomto úkone treba dávať pozor aby do hadičky nevníkol vzduch ktorý by zapríčinil výskyt nežiadúcich bublín vo finálnom kompozite. Vývevu ktorá vytvára vákuum necháme zapnutú až do úplného vytvrdenia vzoriek. Minimálne 24h záleží na teplote okolia, po úplnom vytvrdení môžeme strhnúť fóliu ktorá vytvára polotuhú formu a odlepiť vzorky zo sklenenej podložky. Zo vzoriek bola opatrne odstránená zelená fólia ktorá slúži na rovnomerné rozptýlenie živice po celom vzorku, táto fólia bola odstránená vďaka strhávacej fólie ktorá uľahčí oddelenie od zbytku kompozitu.



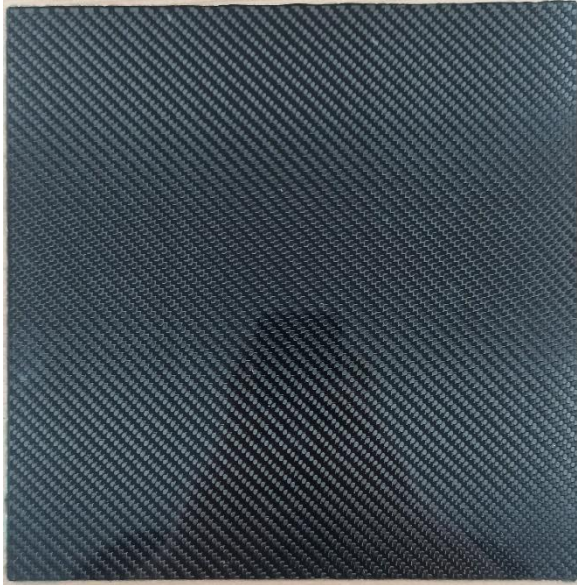
Obr. 27: Látka do 2/3 nasýtená živitou.



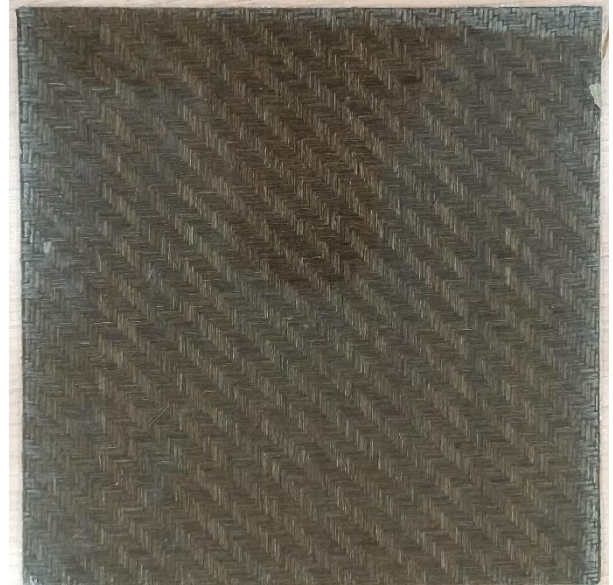
Obr. 28: Látka nasýtená živitou.

3 ZHODNOTENIE KOMPOZITNÝCH VZORIEK

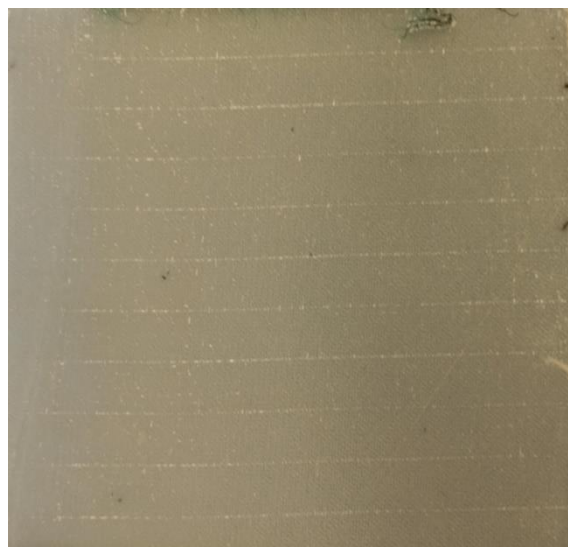
Bolo vyrobených 11 vzoriek kompozitu pomocou vákuovej infúzie, dve vzorky boli vyrobené z uhlíkových vlákien, tri vzorky boli vyrobené zo skleneného vlákna, tri vzorky z ľanu a tri vzorky boli hybridné to znamená že boli skombinované viaceré typy látok ja som použil kombináciu uhlíkového vlákna a ľanu. Vzorky boli rozrezané, odmerané základné hodnoty a zapísané do tabuliek nižšie.



Obr. 29: Vzorka kompozitu z uhlíkového vlákna.



Obr. 30: Vzorka kompozitu z ľanu.



Obr. 31: Vzorka kompozitu vyrobeného zo skleneného vlákna.

Tab. 8 Základné údaje vyrobených vzoriek.

Označenie	Použitý materiál	Textúra	Hrúbka [mm]	Vrstvy
C01	Uhlík	Twill	2,02	8
C02	Uhlík	twill	1,05	4
CL01	Uhlík - ľan	UN	2,65	8
CL02	Uhlík - ľan	UN	1,48	8
CL03	Uhlík - ľan	UN	1,03	8
S01	Sklo	Twill	1,10	4
S02	Sklo	Bi-axial	1,30	4
S03	Sklo	Twill	2,00	8
L01	Ľan	Twill	1,80	4
L02	Ľan	Bi-axial	2,65	4
L03	Ľan	Twill	3,50	8

Tab. 9 Usporiadanie vrstiev a základné namerané údaje.

Označenie	Ukladanie vrstiev	Objem [cm ³]	Hmotnosť [g]
C01	(±45;0/90; ±45;0/90)	97,77	144
C02	(0/90; ±45)	50,82	71
CL01	(±45;0/90; ±45;0/90)	128,26	167
CL02	C(0/90; ±45);L(0/90);C(±45;0/90)	71,63	93
CL03	C(0/90; ±45);L(0/90);C(±45;0/90)	49,85	75
S01	(0/90; ±45)	53,24	83
S02	(0/90; ±45)	62,92	111
S03	(±45;0/90; ±45;0/90)	96,80	165
L01	(0/90; ±45)	87,12	97
L02	(0/90; ±45)	128,26	153
L03	(±45;0/90; ±45;0/90)	169,40	206

3.1 Hmotnostný a objemový podiel

Pre vyjadrenie množstva živice a výstuže v kompozite používame hmotnostný podiel a objemový podiel. Hmotnostný podiel je jednoduchšie získať pri príprave alebo výrobe kompozitu, vyjadruje pomer hmotnosti komponenty k celej hmotnosti vzorku. Podobne je na tom aj objemový podiel ten je výhodnejší získať pri teoretických úvahách a vyjadruje pomer objemu komponenty k celkovému objemu vzorku. [22]

- Hmotnostný podiel,

$$M_v = \frac{m_v}{M_c} \quad M_z = \frac{m_z}{M_c} \quad M_c = M_v + M_z \quad (3.1)$$

- Objemový podiel,

$$V_v = \frac{v_v}{V_c} \quad V_z = \frac{v_z}{V_c} \quad V_c = V_v + V_z \quad (3.2)$$

- Hustota kompozitu,

$$\rho_k = \frac{M_c}{V_c} \quad (3.3)$$

- Hmotnosť vlákna vo vzorku,

$$M_v = p_v * (a * b) * \rho_v \quad (3.4)$$

Tab. 10 Vypočítané údaje.

Označenie	Hustota kompozitu [g/cm]	Hmotnosť vlákna [g]	Hmotnostný podiel vlákna [%]	Objemový podiel vlákna [%]
C01	1,47287456	77,44	53,78	42,00
C02	1,397087761	38,72	54,54	42,74
CL01	1,302042726	68,15	40,81	31,75
CL02	1,298302435	48,01	51,63	49,19
CL03	1,504453181	40,64	54,19	55,90
S01	1,558978212	48,79	58,78	38,51
S02	1,764144946	73,38	66,10	46,13
S03	1,704545455	97,57	59,14	38,86
L01	1,113406795	37,17	38,32	31,12
L02	1,192889443	72,60	47,45	39,64
L03	1,216056671	74,34	36,09	29,11

Z uvedených tabuliek vyplýva že vzorka L03 s najväčšou hrúbkou výsledného kompozitu má najmenší objemový podiel vlákna, vzorka S02 s menšou hrúbkou má najväčší objemový podiel vlákna vo vzorku. Z toho vyplýva že hrúbka finálneho kompozitu má vplyv na podiel vlákna ktorý sa nachádza v kompozite. Ak mám rovnaký počet vrstiev látky a každá vzorka má inú hrúbku to znamená že vzorky ktoré majú väčšiu hrúbku budú obsahovať viac živice ako vzorky ktoré sú tenšie.

- Hmotnosť živice vo vzorku,

$$M_z = M_c - M_v \quad (3.5)$$

- Objem bublín v kompozite,

$$\left[\left(1 - \frac{M_c}{a \cdot b \cdot c \cdot 10^{-1} \cdot \rho_z} \right) + \frac{\rho_v \cdot p_v}{(c \cdot 10^{-1}) \cdot \left(\frac{1}{\rho_z} - \frac{1}{\rho_{vz}} \right)} \right] * 100 \quad (3.6)$$

Tab. 11 Vypočítané údaje.

Označenie	Hmotnosť živice [g]	Hmotnostný podiel živice [%]	Objemový podiel živice [%]	Objem bublín v kompozite [%]
C01	66,56	46,22	58,00	-4,789699749
C02	32,28	45,46	57,26	0,95918992
CL01	98,85	59,19	68,25	-3,315809405
CL02	44,99	48,37	50,81	7,246162928
CL03	34,36	45,81	44,10	-1,039075664
S01	34,21	41,22	61,49	6,687869738
S02	37,63	33,90	53,87	-18,68941219
S03	67,43	40,86	61,14	-1,720970206
L01	59,83	61,88	68,88	10,97828939
L02	80,40	52,55	60,36	7,275400414
L03	131,66	63,91	70,89	2,109967954

Objem bublín v kompozite bol vypočítaný, avšak pravdepodobne s chybou ktorú nebolo možné nájsť. Podiel bublín v kompozite bolo možné skúmať aj rezom vzorku a následnou kontrolou mikroskopom. Vyrobené vzorky sa ďalej skúmajú v škole.

3.2 Ekonomické zhodnotenie

Na výrobu jedného vzorku kompozitu o rozmeru 20x20cm bude potreba zhruba 4m butylovej pásky, 0,5m² látky z vlákna ktoré chcem použiť na výstuž kompozitu, približne 0,13l zmiešanej živice s tužidlom, 2m hadice ktorú rozdelím na dve časti jednu časť použijem na prívod živice do formy a druhú a odvod vzduchu z formy, 1m hadice s špirálovou dierou po celej dĺžke, ktorú takisto rozdelím na dve časti jedna na prívod živice druhá na odvod vzduchu. Ďalej budem potrebovať 0,05m² strhávacej fólie a 0,05m² rozvodnej fólie pre pravidelný rozvod živice. Vedľajšie náklady ktoré tvorili približne 15% z nákladov, vedľajšie náklady obsahujú náklady na acetón, papierovú pásku, separátor Oskar 700, odmerku na rozmiešanie živice. Vývevu a vzdušník do ceny nepočítam pretože boli poskytnuté školou.

Tab. 12 Náklady na výrobu jedného kompozitného vzorku.

Položka	Cena [CZK]
Butylová páska	75,-
Látková výstuž	210,-
Živica	68,-
Tužidlo	25,-
Hadica	44,-
Hadica na rozvod živice	40,-
Strhávacia fólia	4,-
Látka na rozvádzanie živice	7,-
Vákuovacia fólia	35,-
Náklady	508,-
Vedľajšie náklady 15%	76,-
Celkové náklady	584,-

Celkové náklady na výrobu jedného vzorku s rozmermi 20x20cm boli približne 584,- CZK.

ZÁVER

V rešeršnej časti práce som sa zaoberal rozdelením vlákien ich výrobou a vlastnosťami, popísané sú časté chyby, ktoré vznikajú pri výrobe kompozitných materiálov. Boli popísané najpoužívanejšie živice ktoré sa používajú ako matrica na výrobu kompozitu. Technológiu výroby kompozitných materiálov jej rozdelenie a použitie v praxi, som rozpísal podrobne a rozhodol som sa použiť túto technológiu v praktickej časti.

Cieľom práce bolo vyrobiť vzorky pomocou technológie vákuovej infúzie, tieto vzorky boli vyrobené z rôznych materiálov ako uhlíkové vlákno, sklené vlákno a ľan pri niektorých vzorkách bola použitá kombinácia týchto tkanín. Všetky vzorky boli vyrobené z epoxidovej živice LG 700 a bolo použité tužidlo HG 700. Pretože pri vákuovej infúzii prebieha presýtenie tkaniny, tak bolo potrebné spočítať objem živice ktorý bude potrebný na výrobu vzoriek. Bol určený hmotnostný a objemový podiel výstuže jednotlivých vzoriek z čoho vychádza že vzorky vyrobené zo skleného vlákna majú najväčší obsah výstuže a vzorky z ľanu majú najmenší obsah výstuže. Kombináciou uhlíkových vlákien a ľanu bolo dosiahnuté lepších výsledkov a tento hybridný materiál mal lepšie výsledky ako vzorka so samostatnými ľanovými vláknami.

Z ekonomického hľadiska je výroba kompozitných materiálov dosť finančne náročná čo vyplýva z výpočtu ceny jedného vyrobeného vzorku ktorého cena je približne 584 CZK.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

1. DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
 2. CAMPBELL, F.C. *Structural composite materials*. Ohio: Materials Park, 2010. ISBN 1615031405.
 3. KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-708-0568-4.
 4. EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
 5. HEARLE, J.W.S. *High-performance fibres* [online]. Sawston: Woodhead Publishing, 2001 [cit. 2022-04-20]. ISBN 978-1-85-573754-9. Dostupné z: https://app.knovel.com/kn/resources/kpHPF00012/toc?q=fibres&sort_on=default&bsubscription=TRUE&b-group-by=true&b-sort-on=default&query=fibres
 6. ŠŇUPÁREK, Jaromír. *Makromolekulární chemie: úvod do chemie a technologie polymerů*. Vyd. 3., dopl. a upr. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2014. ISBN 978-80-7395-761-2.
 7. MOHITE, P. M. *Composite materials and structures: Introduction to Composites* [online]. 2014 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <http://nptel.ac.in/courses/101104010/lecture1/main.html>
 8. AGARWAL, Bhagwan D., Lawrence J. BROUTMAN a Lubomír SODOMKA. *Vláknové kompozity: celost. vysokošk. příručka pro vys. školy techn.* Praha: SNTL, 1987.
 9. Technologies. *Composites* [online]. 2014 [cit. 2022-04-21]. Dostupné z: <http://www.composites.com>
 10. DEFENSE, U.S. Department of. *Nondestructive active testing techniques for structural composites* [online]. Washington D.C.: U.S. Dept. of Defense, 1989 [cit. 2014-01-05]. ISBN 978-159-1241-874. Dostupné z: http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpMHMILH04/viewerType:toc/root_slug:militar-y-handbook-mil-6/url_slug:military-handbook-mil-6
 11. VLÁKNA PRO KOMPOZITY. Web.archive.org [online]. [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20100401025714/http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>
 12. ASTRÖM, B. T. *Manufacturing of polymer composites*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group, an Informa business, 2017. ISBN 978-1-138-45958-8. Monografie.
-

13. BAREŠ, Richard, Richard A BAREŠ a Jaroslav NĚMEC. *Kompozitní materiály*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988, 325 s. : obr., čb. fot., tabulky, grafy.
 14. Experimental studies of thin-ply laminated composites. *Composites Science and Technology* [online]. 2007, (67), 996-1008 [cit. 2019-06-29]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353806002168>
 15. FORSDYKE, K.L. a T.F. STARR. *Thermoset Resins* [online]. Shrewsbury: Rapra Technology Limited, 2002 [cit. 2022-05-20]. ISBN 1-85957-355-1. Dostupné z: <https://dokumen.tips/documents/thermoset-resins-market-report.html?page=4>
 16. CRIPPS, D., T.J. SEARLE a J. SUMMERSCALE. *Comprehensive Composite Materials*. Pergamon: Elsevier, 2000. ISBN 9780080429939.
 17. KOEFOED, M.S. *Modeling and simulation of the VARTM process for wind turbine blades*. Aalborg, 2003. Ph.D. thesis. Aalborg University.
 18. CORREIA, N.C., F. ROBITAILLE, A.C. LONG, C.D. RUDD, P. ŠIMÁČEK a S.G. ADVANI. *Analysis of the vacuum infusion moulding process: I. Analytical formulation* [online]. 2005, 12 [cit. 2022-05-20]. ISSN 1359-835X. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.03.019>.
 19. KELKAR, Ajit D.; VAIDYA, Uday. *Low cost manufacturing of composite integral armor using resin transfer and resin infusion molding processes*. In: *Proceedings of Fifth International Conference on Flow Processes in Composite, 12th-14th July. 1999*.
 20. GREEN, P. R. *Improvements in or relating to methods of producing reinforced plastic structures*. *British Patent*, 1963, 944955: 18.
 21. HINDERSMANN, Arne. *Confusion about infusion: An overview of infusion processes* [online]. 2019, 11 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105583>.
 22. JURAČKA, Jaroslav. *Kompozitní konstrukce v letectví*. Brno.
-

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Symbole

Označení	Legenda	Jednotka
a	strana vzorku	[cm]
b	strana vzorku	[cm]
c	výška vzorku	[mm]
E	modul pružnosti	[Pa]
M_c	hmotnosť celková	[g]
M_v	hmotnostný podiel vlákna	[%]
m_v	hmotnosť vlákna	[g]
$M_{\dot{z}}$	hmotnostný podiel živice	[%]
$m_{\dot{z}}$	hmotnosť živice	[g]
p_v	počet vrstiev	[-]
V_c	objem celkový	[cm ³]
V_v	objemový podiel vlákna	[%]
v_v	objem vlákna	[cm ³]
$V_{\dot{z}}$	objemový podiel živice	[%]
$v_{\dot{z}}$	objem živice	[cm ³]
ρ_k	hustota kompozitu	[g/cm]
ρ_v	hustota vlákna	[g/cm]
ρ_{vz}	hustota vzorku	[g/cm]
$\rho_{\dot{z}}$	hustota živice	[g/cm]

Zkratky

Označení	Legenda
A-VARTM	Advanced VARTM
CAPRI	Controlled Atmospheric Pressure Resin Infusion
CARTM	Channel Assisted Resin Transfer Moulding
CCBM	Closed Cavity Bag Moulding
Crystalic VI	Crystic Vacuum Infusion
DBVI	Double Bag Vacuum Infusion Process
DP-RTM	Differential Pressure Resin Transfer Moulding
DRDF	Double RIFT Diaphragm Forming
FASTRAC	Fast Remotely Actuated Channel
IRIS	Intelligent Resin Infusion System
LPRIM	Low Pressure Resin Infusion Moulding
MVI	Modified Vacuum Infusion
PAN	polyakrylonitril
PI	Pulsed Infusion
RIDFT	Resin Infusion between Double Flexible Tooling
RIRM	Resin Injection Recirculation Method
RTI	Resin Transfer Infusion
RTM	Resin Transfer Moulding
SCRIMP	Seeman's Composite Resin Infusion Moulding Process
SLI	Single Line Injection
VADPI	Vacuum Assisted Differential Pressure Infusion

VAIM	Vacuum Assisted Injection Moulding
VAP	Vacuum Assisted Process
VARI	Vacuum Assisted Resin Injection
VARIM	Vacuum Assisted Resin Infusion Moulding
VARTM	Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding
VIMP	Variable Infusion Moulding Process
VIPR	Vacuum Induced Preform Relaxation
VRIM	Vacuum Resin Injection Moulding
VRIP	Vacuum Resin Impregnation Process



ZOZNAM PRÍLOH

Příloha 1 Technický list LG 700 a HG 700



Laminační pryskyřice (Laminační systém)**LG 700**

pro RTM

Tužidla HG 700 F, HG 700 M, HG 700, HG 737, HG 700 S**1. Popis**

Laminační systém LG 700 je epoxidový systém nové generace, na bázi silně modifikované epoxidové pryskyřice a několika tvrdidel, kterými lze nastavit rozdílnou zpracovatelnost a podmínky vytvrzení.

Laminační pryskyřice LG 700 je velmi tekutá pryskyřice se zvýšenou vazností a reaktivitou, vyznačující se mimořádnou flexibilitou při zachování velmi vysoké teplotní odolnosti. Pryskyřice obsahuje modifikační činidla, maximálně zlepšující průnik laminační směsi do tkaniny.

- Tužidlo HG 700 F** je velmi rychlé tužidlo s několika akcelerátory, umožňující velmi krátký temperační cyklus. Je určeno zejména pro sériovou výrobu menších dílů. Gel-time (100g) při 23°C je 20 minut.
- Tužidlo HG 700 M** je rychlé tužidlo s akcelerátorem, umožňující krátký temperační cyklus. Je vhodné pro výrobu menších a středně velkých dílů. Gel-time (100g) při 23°C je 50 minut.
- Tužidlo HG 700** je základní varianta tužidla pro epoxid LG 700. Je velmi tekuté a proto vhodné pro infuzi i těch nejtěsnějších materiálových skladeb. Gel-time (100g) při 23°C je 90 minut.
- Tužidlo HG 737** je velmi pomalé tužidlo pro injektáž velkých dílů nebo velmi silných materiálových skladeb. Ani při síle laminátu nad 1 cm nedochází k zahoření směsi. Gel-time (100g) při 23°C je cca 3 hodiny.
- Tužidlo HG 700 S** je velmi pomalé tužidlo. Gel-time (100g) při 23°C je cca 4-6 hodin.

2. Použití

Laminační systém 700 se používá zejména pro RTM, ale je možné ho použít i pro ruční laminaci za pokojové i zvýšené teploty. Je vhodný k přípravě komposit s vyšší tepelnou odolností a výbornými mechanickými vlastnostmi. Je předurčen k výrobě i náročných kompozitních dílců. Směsná viskozita systému je 300 – 350 mPa/s dle teploty a použitého tvrdidla.

Systém je použitelný pro všechny běžně používané výztuže, jako jsou například skleněná, uhlíková nebo aramidová vlákna, sendvičové materiály atd.

Systém je kompatibilní s většinou běžných i polyesterových gelcoatů. Přesto doporučujeme jednotlivé kombinace nejprve předem vyzkoušet.

2.1 Pracovní postup

Se systémem doporučujeme pracovat v rozmezí teplot 18 až 30°C běžnými zpracovatelskými postupy pro výrobu kompozitů.

Tento systém byl navržen tak, aby dostatečně vytvrzoval i při pokojové teplotě od 18 - 30°C, proto může být zpracováván i při pokojové teplotě a používán bez následného tepelného vytvrzení. Doba zpracovatelnosti je 20 – 180 minut při pokojové teplotě (podle typu tužidla).

Při vytvrzení za tepla lze dosáhnout teplotní odolnosti až 120°C, viz. tabulka teplotních odolností (str.2).

Laminační pryskyčice LG 700 pro RTM + Tužidla HG 700 F, HG 700 M, HG 700, HG 737, HG 700 S

Gel time: (nános do vrstvy 1 mm při různých teplotách)

LG 700	HG 700 F	HG 700 M	HG 700	HG 737	HG 700 S
při 25°C	1 – 2 hod.	2 – 3 hod	3 – 5 hod	8 – 12 hod	12 – 14 hod
při 50°C	25 min.	50 min.	1,5 hod	2 – 3 hod	4 - 6 hod

Teplotní odolnost (Tg):

LG 700	HG 700 F	HG 700 M	HG 700	HG 737	HG 700 S
při 23°C (2-7 dní)	55°C	60°C	60°C	55°C	45°C
při 50°C (3 hodiny)	65°C	70°C	70°C	65°C	55°C
při 60°C (> 3 hodiny)	75°C	80°C	80°C	75°C	60°C
při 90°C (> 2 hodiny)	95°C	100°C	100°C	95°C	85°C
při 120°C (2 hodiny)	105°C	110°C	110°C	105°C	95°C

Poměr míchání pryskyčice + tužidlo:

Složky váhové	100 : 30
Složky objemové	100 : 38

2.2 Technické parametry

Vlastnosti:

		LG 700
Hustota	g/cm ³ (25°C)	1,18 - 1,23
Viskozita	mPa.s (25°C)	500 – 700
Ekvivalent epoxidu	mol/1kg	156 – 165
Index epoxidu	-	0,60 - 0,64
Barva	Gardner	max 3

		HG 700 F	HG 700 M	HG 700	HG 737	HG 700 S
Hustota	g/cm ³ (25°C)	0,98	0,96	0,94	0,98	0,96
Viskozita	mPa.s (25°C)	30 - 40	35 - 50	15 - 20	10 - 15	10-15
Vodíkový ekvivalent	-	48	48	48	48	48
Barva	Gardner	max 3*	max 3*	max 3*	max 3*	max 3*
Směsná viskozita	mPa.s (25°C)	320 - 328	450 - 457	245 - 249	277 - 285	277-285

* Vztahuje se k nebarvenému tužidlu.

Podrobnosti pro zpracování:

	LG 700	HG 700 F	HG 700 M	HG 700	HG 737	HG 700 S
Průměrná hodnota epoxidu	0,62	-	-	-	-	-
Průměrný ekvivalent aminu	-	48	48	48	48	48
Skladování	24 (epoxid), 12 měsíců (tužidla) v uzavřeném obalu					

Laminační pryskyřice LG 700 pro RTM + Tužidla HG 700 F, HG 700 M, HG 700, HG 737, HG 700 S**Orientační mechanické parametry vytvrzené nevyztužené pryskyřice:**

Mez pevnosti a ohybu	MPa	110 - 120
E - modul - ohyb	MPa	2700 - 3300
Mez pevnosti v tahu	MPa	65 - 75
Mez pevnosti v tlaku	MPa	120 - 140
Tažnost	%	6 - 8
Rázová houževnatost	KJ/m ²	38 - 48
Shore D	-	85

3. Skladování a balení

Pryskyřice mohou být skladovány po dobu nejméně 24 měsíců, tužidla 12 měsíců v pečlivě uzavřených obalech. Při teplotách pod + 15°C mohou pryskyřice a tužidla zkrystalizovat. Krystalizace je patrná jako zamlžení či změna tekuté podoby obsahu obalu na pevnou. Před zpracováním se musí krystalizace zahřátím odstranit. Pomalu zahřejete obsah obalu až do přibližně 50 - 60°C ve vodní lázni nebo peci a mícháním či potřásáním uvedete materiál do původního stavu bez jakékoli vady na kvalitě. Zpracovávejte pouze výrobky zcela jednotné barvy. Před zahřátím lehce obal otevřete, aby došlo k vyrovnání tlaku. Během zahřívání buďte opatrní. Nezahřívajte nad otevřeným ohněm! Při míchání používejte bezpečnostní pomůcky (rukavice, brýle, respirátor).

4. Kontakt**Výrobce/Dovozce:**

GRM Systems s.r.o.
Slatinky č.p.158
PSČ 783 42
CZECH REPUBLIC

Tel.: +420 585 431 734
Fax: +420 585 431 994
www.grm-systems.cz
info@grm-systems.cz

KANCELÁŘ A SKLAD
GRM Systems s.r.o.
Technologická 28
779 00 Olomouc
CZECH REPUBLIC

Technický servis:

Zbyněk Gofroj

Tel.: +420 777 766 706
zbynek@grm-systems.cz

Poznámka

Tento technický list byl vytvořen na základě našich nejnovějších poznatků a podle nejlepšího vědomí a svědomí. Jelikož nejsme schopni kontrolovat správnost použití našich výrobků, nemůžeme garantovat ani výsledky.