

Vliv technologie výroby kompozitů na výsledné mechanické vlastnosti

Bc. Michal Konečný

Diplomová práce
2017

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal Konečný**
Osobní číslo: **T15404**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Vliv technologie výroby kompozitů na výsledné mechanické vlastnosti**

Zásady pro vypracování:

1. Literární rešerše v oblasti kompozitů, vlákna, matrice.
2. Zpracovatelské technologie kompozitních materiálů.
3. Testování kompozitních materiálů, přehled jednotlivých metodik a způsobů vyhodnocování.
4. Návrh zkušebních vzorků pro zjištění vlivu technologie na výsledné mechanické vlastnosti.
5. Výroba zkušebních vzorků ze zvolených výrobních technologií.
6. Příprava zkušebních těles dle doporučení vedoucího práce.
7. Experimentální testování a vyhodnocení dosažených výsledků.
8. Závěr diplomové práce a diskuze.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

2. ledna 2017

Termín odevzdání diplomové práce:

12. května 2017

Ve Zlíně dne 23. ledna 2017

doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: Konečný, Michal.....

Obor: Výrobní inženýrství

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 9.6.2017.....


.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá výrobou kompozitů z uhlíkové a skelné tkaniny pomocí vybraných technologií. Jako technologie bude využito ruční kladení za mokra, ruční kladení s dolisováním pod vakuovou folii a vakuová infuze. Následně budou provedeny zvolené zkoušky mechanických vlastností vyrobených vzorků. Dále bude proveden orientační výpočet nákladů na výrobu desky pro zjednodušené porovnání výrobních nákladů. Získané výsledky by měly sloužit pro zjednodušení volby výrobní technologie dle aplikace konkrétního výrobku a pro zjištění vliv výrobní technologie na kvalitu výrobku.

Klíčová slova: uhlíkový kompozit, vakuová infuze, ruční kladení za mokra, ruční kladení s dolisováním pod vakuovou folii, uhlíková tkanina, skelná tkanina, tahová zkouška, ohybová zkouška, tlaková zkouška.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the production of composites made of carbon and glass fiber with using chosen technologies. The technologies that will be used are hand lay-up, vacuum bagging and vacuum infusion. Subsequently, selected tests of mechanical properties will be executed on produced samples. Next, an indicative calculation of costs of the production of the desk will be done for a simplified comparison of the production costs. The obtained results should help to simplify the choice of a production technology based on the application on a particular product and discover the effect of the production technology on the quality of the product.

Keywords: Carbon composite, vacuum infusion, hand lay-up, vacuum bagging, carbon fiber, glass fiber, tensile test, bend test, pressure test.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	12
1.1 DĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ PODLE TVARU VÝZTUŽE	13
1.2 HISTORIE	14
1.3 ZÁKLADNÍ POJMY	15
2 MATRICE	17
2.1 EPOXIDOVÉ PRYSKYŘICE	17
2.2 NENASYCENÉ POLYESTEROVÉ PRYSKYŘICE	18
2.3 VINYLESTEROVÉ PRYSKYŘICE	18
2.4 FENOLICKÉ PRYSKYŘICE	18
3 VÝZTUŽ	19
3.1 UHLÍKOVÉ VLÁKNO	20
3.2 SKELNÁ VLÁKNA	22
3.3 ARAMIDOVÁ VLÁKNA	23
3.4 PŘÍRODNÍ VLÁKNA	25
3.5 DRUHY VAZEB	26
3.6 PRODUKTY Z VLÁKEN	27
4 VÝROBA KOMPOZITNÍCH SOUČÁSTÍ	29
4.1 POMOCNÉ MATERIÁLY	29
4.1.1 Odsávací rohož	29
4.1.2 Vakuovací folie	30
4.1.3 Separální folie	30
4.1.4 Distribuční media - sít'ky	31
4.1.5 Odtrhová tkanina	31
4.1.6 Těsnící páska	32
4.1.7 Vakuové ventily, hadice a spojky	32
4.2 VÝROBNÍ METODY	33
4.2.1 Ruční kladení za mokra	33
4.2.2 Stříkání	34
4.2.3 Ruční kladení s dolisováním pod vakuovou folii	34
4.2.4 Vakuová infuze	35
5 ÚVOD DO MECHANIKY KOMPOZITŮ	37
5.1 DRUHY NAMÁHÁNÍ	37
5.2 MECHANISMY PORUŠOVÁNÍ KOMPOZITŮ	39
5.3 MECHANICKÉ ZKOUŠKY	41
5.3.1 Zkouška Tahem	41
5.3.2 Zkouška Tlakem	42
5.3.3 Zkouška Ohybem	44
II PRAKTICKÁ ČÁST	46
6 CÍLE PRÁCE	47
7 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	48

7.1	PŘÍPRAVA FORMY	48
7.2	POUŽITÉ MATERIÁLY	48
7.3	RUČNÍ KLADENÍ ZA MOKRA	49
7.4	RUČNÍ KLADENÍ S DOLISOVÁNÍM	50
7.5	VAKUOVÁ INFUZE	52
7.6	ŘEZÁNÍ DESEK NA ZKUŠEBNÍ TĚLESA	54
8	STATICKE ZKOUŠKY	56
8.1	ZKUŠEBNÍ STROJ	56
8.2	ZKOUŠKA TAHEM	57
8.2.1	Výsledky jednotlivých měření zkoušky tahem	58
8.2.2	Diskuze a vyhodnocení tahové zkoušky	64
8.3	ZKOUŠKA TLAKEM	66
8.3.1	Výsledky jednotlivých měření zkoušky tlakem	67
8.3.2	Diskuze a vyhodnocení zkoušky tlakem	73
8.4	ZKOUŠKA TROJBODOVÝM OHYBEM	75
8.4.1	Výsledky jednotlivých měření zkoušky ohybem	76
8.4.2	Diskuze a vyhodnocení ohybové zkoušky	82
8.5	CENA MATERIÁLU PRO VÝROBU	84
	ZÁVĚR	87
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	89
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	91
	SEZNAM OBRÁZKŮ	92
	SEZNAM TABULEK	95
	SEZNAM PŘÍLOH	97

ÚVOD

Jelikož se stále rozvíjí technologie ve všech konstrukčních odvětvích, dochází k postupnému nahrazování konvenčních materiálů jako jsou ocel, hliník a jiné kovy za kompozity. Hlavními důvody jsou požadavky na snížení hmotnosti, zlepšení mechanických vlastností, snížení ceny, výrobní náročnosti a odolnosti proti specifickým vnějším vlivům.

Čím dál více se začínají používat kompozity na bázi uhlíkových, skelných, aramidových a ostatních vláken. Každý druh vlákna a matrice má své specifické vlastnosti jako je pevnost, houževnatost, charakteristika lomu, odolnost proti opotřebení, hmotnost, odolnost vůči hoření apod. Proto je nutné pro volbu vlákna, tkaniny, matrice a výrobní technologie znát jejich vlastnosti, které jsou popsány v následujících kapitolách.

Druhá, praktická část diplomové práce se zabývá výrobou a porovnáním kompozitů na bázi skelného a uhlíkového vlákna, jelikož jsou stále více používány pro různé konstrukční řešení. Uhlíkové vlákno je zajímavé svými mechanickými vlastnostmi, nízkou hmotností a v pohledových dílech i svým atraktivním vzhledem. Nicméně v některých aplikacích je nepoužitelné z důvodu charakteristického tříštivého lomu a bohužel i svou vysokou cenou. Naopak skelné vlákno je jedno z nejlevnějších a nejhojněji využívaných vláken. Výsledné mechanické vlastnosti výrobku nejsou ovlivněny pouze druhem použité výztuže a matrice, ale jsou také závislé na použité výrobní technologii. Proto se tato práce v praktické části zabývá porovnáním třech vybraných výrobních technologií. Každá technologie by měla vykazovat nejen svou výrobní kvalitu, ale také technologickou náročnost a požadavky na zručnost pracovníka. Vyrobené vzorky by měly vykazovat mechanické vlastnosti v závislosti na technologii výroby. Případně by mělo být možné určit, která z technologií je nejméně kvalitativně závislá na erudovanosti pracovníka.

V poslední, třetí části jsou shrnuty výsledky zkoušek vyrobených vzorků, srovnání časové a finanční náročnosti výrobní technologie s následným závěrem ze získaných výsledků.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Jsou materiály, které jsou složeny ze dvou a více složek, které mají rozdílné chemické a fyzikální vlastnosti. Spojitá součást se nazývá matrice, která je obvykle poddajnější, zastává funkci pojiva a současně udává finálnímu výrobku tvar. Druhou složkou je výztuž, která je tvrdší a tužší než matrice a udává výsledné mechanické vlastnosti kompozitu. [1]

Podle nynějšího chápání, za kompozit považujeme dvou a více složkové materiály, které splňují následující tvrzení:

- „podíl výztuže musí být větší než 5% “
- „vlastnosti výztuže a matrice (mechanické, fyzikální i chemické) se liší, výztuž je významně pevnější v tahu a obvykle tužší než matrice “
- „kompozit musí být připraven smícháním složek “

[2]

Za kompozitní materiál nelze považovat plast, který obsahuje tuhá barviva jako jsou například saze, nebo oxid TiO_2 -bílý pigment. Jelikož přidáním těchto plniv dojde k snížení modulu pružnosti výsledného materiálu. [1,3]



Obr. 1. Základní dělení kompozitních materiálů podle geometrické formy výztuže [4]

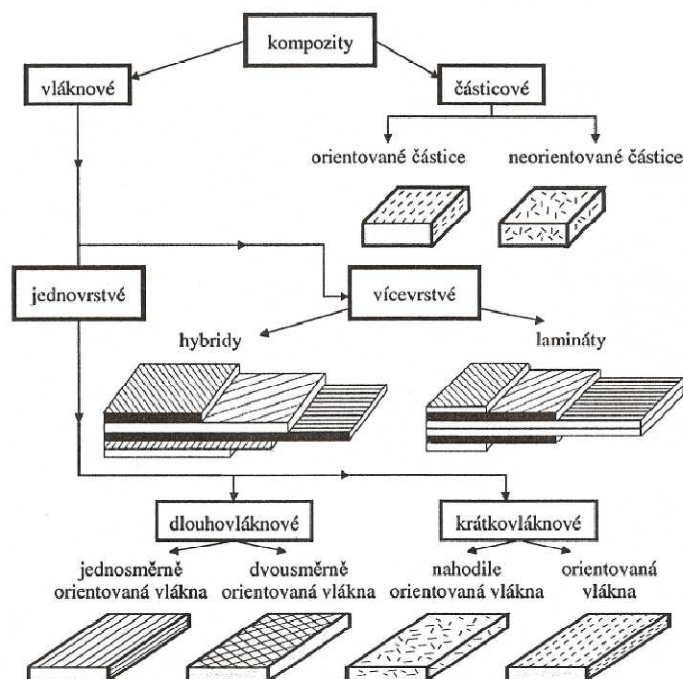
Mezi hlavní výhody kompozitních výrobků patří:

- velmi dobrá odolnost proti korozi a širokému spektru agresivních prostředí. Hlavní ochrannou složkou je matrice
- nízká měrná hmotnost, která je až 4x menší než ocel
- jednoduchá výroba velkých dílů s vysokou pevností
- vynikající tepelné a elektrické / elektroizolační vlastnosti
- výrobky propouští elektromagnetické záření. Proto jsou vhodné na kryty radarů, případně pro radary nezachytitelných letounů např.: Lockheed F117 Nighthawk nebo F-35 Lightning II [5]
- možnost probarvení výrobku případně výroba průsvitných panelů [6]

1.1 Dělení kompozitních materiálů podle tvaru výztuže

Nejjednodušším hlediskem dělení kompozitu je tvar použité výztuže. Může být ve formě vláken nebo částic.

Za vlákna se považuje druh výztuže, která má délku mnohonásobně větší než průměr. Dále se dělí na krátkovláknové kde poměr délky ku průměru je méně než 100, za dlouhovláknové považujeme výztuže s poměrem délky ku průměru více jak 100. Hlavním důvodem použití vláknové výztuže je zlepšení mechanických vlastností výrobku. [7]



Obr. 2. Rozdělení kompozitů [8]

Výztuž ve formě částic je definována jako nevláknový útvar, který má tvar koule, kvádrů, krychle apod. Částice se mohou podílet na přenosu namáhání, ale ne tak mnoho jako vlákna. Jsou používány pro zlepšení elektrických vlastností, zlepšení tepelné vodivosti, zvýšení odolnosti proti opotřebení, snížení tření, nebo zlepšení mechanických vlastností. [1]

1.2 Historie

Historie kompozitních materiálů sahá do dob 800 let př. n. l. kde prvotní zmínky o mísení hlíny s kousky slámy nalezneme v Bibli. Výskyt tohoto prvního kompozitu potvrzují i nálezy z Izreale.

Novodobější historie kompozitů začíná v letech 1906-1907 kdy L.H Baekeland patentuje kompozitní materiál na bázi fenolické pryskyřice vyztužené dřevěnou moučkou. V současné době H. Lebach vytvořil kompozit na bázi fenolické pryskyřice vyztužené azbestovým vláknem pro výrobu chemicky odolných nádrží.

V roce 1933-1935 začíná výroba prvních skelných vláken v USA firmou Owens-Illinois Glass Co. V roce 1938 přichází první patent na epoxidovou pryskyřici P. Castan. Poté v roce 1942 vznikají první kryty radarů v letadlech z kompozitu složeného z reaktoplastické matrice a výztuže ze skelné tkaniny. Jelikož se skelné vlákno projevilo jako vhodné, bylo v roce 1943 použito také v konstrukci vojenského letounu Spitfire. Jednalo se o první sendvičovou konstrukci složenou z polyesterové pryskyřice a sklené tkaniny s jádrem z balzového dřeva.

V letech 1956 - 1972 začíná využívat kompozitní materiály s výztuží ze skleného vlákna firma Citroen pro výrobu střechy. V roce 1970 již začíná používat sklolaminát na výrobu nárazníku vozidla Citroen R5. Současně jsou kompozity používány na konstrukci vojenských člunů (minolovek) nebo, částí karoserií automobilů (Chrysler, Corvette).

Paralelně v roce 1957 vzniká první uhlíkové vlákno vyráběné z viskózy firmou Union Carbide (USA). Bohužel se jednalo o složitou a málo produktivní výrobu. Současně probíhal výzkum uhlíkového vlákna i v Japonsku kde v roce 1961 společnost Toray vytvořila první uhlíkové vlákno z polyakrylonitrilu. Komerční výroba začala v roce 1971 s množstvím 12 tun/rok. Technologie výroby vlákna z polyakrylonitrilu se využívá do dnes, s inovacemi výrobní technologie. V roce 1981 je uhlíkový kompozit poprvé využit na konstrukci kokpitu vozidla formule 1 (J. Bernard, C. Chapman, G. Brunner). V roce 1985 je použit kom-

pozit vyztužený uhlíkovým vláknem v konstrukci letounu Airbus A310-300 na střední část trupu a směrovky.

Jako poslední a nejmladší vlákno je aramidové, které vešlo do produkce v roce 1971 firmou Du Pont pod obchodním názvem Kevlar. [3]

1.3 Základní pojmy

Adheze	soudržnost (přilnavost) dvou různých materiálů na jejich kontaktních plochách (hranicích)
Anizotropie	závislost vlastnosti materiálu na směru
Apretura	vrstva ke zvýšení přilnavosti (adheze) k povrchu vlákna (obvykle organosilany, méně než 0,05 % hmotnosti vlákna)
Delaminace	místní rozdělení vrstev laminátu
Finiš	apretura, která se nanáší na delubrikovanou tkaninu (cca 5 %)
Homogenní	stejnorodý
Izotropní	mající směrově nezávislé vlastnosti
Kompozit	není v pravém slova smyslu hotový materiál, ale surovina „ <i>stavební prvek</i> “, skládající se z určitého množství vyztužujících vláken (orientovaných přednostně v určitých směrech) a matrice (pojiva)
Laminát	označuje kompozit ve tvaru plošného výrobku z jednotlivých rozlišitelných vrstev, který vzniká spojením vláken a pryskyřice nezávisle na formě konstrukčního prvku nebo na stavu výroby (nevytvrzený, vytvrzený laminát)
Laminát jednosměrný	obsahuje vyztužující vlákna orientovaná pouze v jednom směru
Laminát vícevrstvý	kompozitní vrstva skládající se z rozdílných nebo různě orientovaných vrstev
Lubrikace („šlichta“)	většinou organická nereaktivní látka (cca 1,5%), která se nanáší na elementární skelná vlákna po vytažení z trysky, aby se snížilo možné poškození vláken otěrem a aby se vlákna vzájemně udržela pohromadě

Matrice – pojivo	materiál pro „ukládání“ vyztužujících vláken, nejčastěji plast (termoset, termoplast), ale také kov (např. hliník vyztužený borovým vláknem), uhlík, keramika. Úkolem matrice je zaručení geometrického tvaru, zavedení a přenos sil, ochrana vláken
Ortotropie	druh anizotropie vyznačující se třemi vzájemně kolmými rovinami symetrie
Pojivo	látka, která se nanáší na rohož, aby ji zpevnila a udržela vlákna v soudržném stavu
Porušení mezivláknové	porušení probíhající mezi vlákny, které prochází celou tloušťkou jednosměrné vrstvy
Porušení vlákna	porušení, při kterém se poruší velké množství elementárních vláken
Pramen	vzniká spojením cca 200 elementárních vláken bez kroucení
Prepreg	částečně vytvrzená lisovací hmota (polotovar)
Příze	kroucená nebo nekroucená vlákna určená k textilnímu zpracování
Rohož	plošná výztuž skládající se z nekonečných nebo sekaných, nahodile orientovaných, pramenců vláken spojených pojivem
Roving (prameneček)	vzniká sdružením určitého počtu základních pramenů bez jejich zkroucení
Rozpojení (debonding)	oddělení matrice od vlákna
Tkanina	skládá se ze vzájemně se křížících, propletených systémů vláken, plošná dobře zpracovatelná výztuž
Vlákně elementární	nekonečné skelné vlákno s průměrem většinou od 5 do 27 μm
Vlákně sekané (stříž)	vlákno určité délky
Vrstva	stavební prvek laminátu
Vrstva jednosměrná	vrstva nebo laminát s jednosměrně orientovanými vyztužujícími vlákny

2 MATRICE

Matrice je spojitou součástí kompozitního výrobku, která po vytvrzení chrání vlákna proti vnějším vlivům. Udržuje požadovaný tvar výrobku, přenáší působení sil na vlákna, zajišťuje vzájemnou polohu vláken vůči sobě. Po prosycení vláken pomocí matrice označujeme vzniklý výrobek slovem kompozit.

Druh matrice se volí dle aplikace finálního výrobku v závislosti na tepelném i mechanickém namáhání. Nejčastěji se používají matrice na bázi termosetů nebo v menší míře na bázi termoplastů. Značnou nevýhodou termoplastické matrice je vysoká viskozita (2-4x větší než termosety), která zapříčiňuje obtížné zpracování, špatnou smáčivost vláken, ale také obtížné odstranění vzduchových bublin. [3]

Nejčastěji se používají termosety: nenasyčené polyestery (UP), fenolické pryskyřice (PR) vinylestery (VE) a epoxidy (EP).

Tabulka 1. Vlastnosti vybraných matric [9]

Druh matrice	Hustota (g/cm ³)	Pevnost (MPa)	Modul (MPa)
Termosety	1,1 - 1,67	20 - 180	1 300 - 6 000
Epoxy	1,1 - 1,4	35 - 90	2 100 - 6 000
Polyestery	1,1 - 1,5	45 - 85	1 300 - 4 500
Fenolické pryskyřice	1,3	50 - 60	4 400
Polyamidy	1,2 - 1,9	80 - 190	3 000 - 3 100

2.1 Epoxidové pryskyřice

Jsou nejvšestrannější druh pryskyřic pro rozmanité konstrukční využití. V závislosti na použitém tvrdidle a dalších složkách je možné měnit rozsah vlastností. Mezi základní charakteristiky epoxidových pryskyřic patří: dobrá houževnatost, výborná adheze k vláknům, uspokojivá tepelná odolnost, dobré elektrické vlastnosti, chemická odolnost, odolnost proti únavě a tečení (creepu). Nevýhodou je, že jsou navlhavé a při kontaktu s vodou je nutné počítat se zhoršením tepelné odolnosti. Při vytvrzování pryskyřice se neuvolňují vedlejší produkty, takže pro výrobu kompozitu bez dutin není potřeba vysokého tlaku. [3]

2.2 Nenasycené polyesterové pryskyřice

Jedná se o nejpoužívanější druh pryskyřice. Jsou bezbarvé nebo slabě nažloutlé. Při vytvrzování se uvolňuje reakční teplo a dochází k objemovému smrštění o 5 až 9%. Připravují se smícháním dvou složek, polypropylenglykolu a kyseliny ftalátové, maleinové, nebo kumaronové. Tak vznikne lineární nenasycený polyester. Vzniklý předpolymer se následně rozpouští v reaktivním rozpouštědle jako je například styren. Existují však nestyrenové nenasycené polyesterové pryskyřice, kde se jako reaktivní rozpouštědlo používají některé druhy methakrylátu. Následné zpracování probíhá za zvýšené teploty, aby se zvýšila rychlost vytvrzování. [1,3]

2.3 Vinylesterové pryskyřice

Jedná se o nenasycené estery epoxidových pryskyřic. Obsahují reaktivní činidlo kterým je obvykle styren. Povaha molekuly předpolymeru vinylesterové pryskyřice vykazuje méně reaktivních míst než nenasycené polyesterové pryskyřice a dvojná vazba se vyskytuje pouze na koncích molekulárních řetězců. Proto vykazují menší stupeň sesíťování, který vede k lepší ohebnosti, odolnosti proti tvorbě mikrotrhlin, větší mezilaminární pevnosti a větší houževnatosti než kompozity tvořené nenasycenou polyesterovou pryskyřicí. V porovnání s nenasycenou polyesterovou pryskyřicí mají vinylesterové pryskyřice lepší odolnost vůči korozi, vytvrzovací reakce je pomalejší a teplota skelného přechodu je větší, takže mají lepší tepelnou odolnost. [1,3]

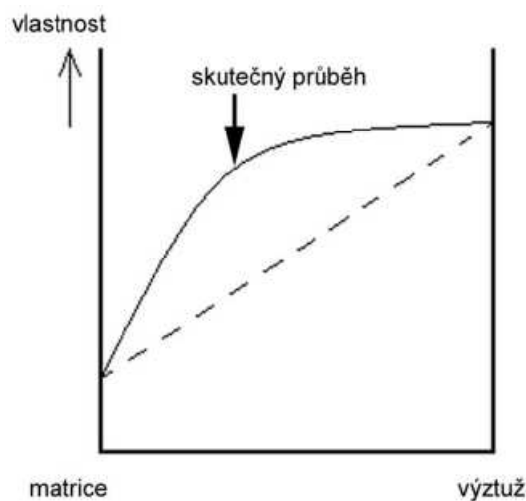
2.4 Fenolické pryskyřice

Jsou reaktivní pryskyřice, které jsou vyráběny pomocí kondenzace fenolu a 30% - 50% vodných roztoků aldehydu (formaldehydu). Varianty vycházejí z použitých fenolických surovin. Síťování může být provedeno pomocí kyselin, ale v čistším případě pomocí působení tepla. Fenolických pryskyřice na bázi novolaku obvykle na světle hnědnou a při vytvrzování se mohou zbarvit. Proto se vyrábějí v tmavých krycích odstínech. Jejich podíl na výrobcích je malý, ale své podstatné místo obsazují v kompozitních součástech dopravních prostředků, jelikož jsou vysoce tepelně i chemicky odolné a při požáru si zachovávají vysokou zbytkovou pevnost. [1]

3 VÝZTUŽ

Za výztuž nebo také vyztužující vlákna považujeme materiál, který upravuje některé vlastnosti kompozitu dle konstrukčního požadavku. Například zvýšení houževnatosti, pevnosti v tahu nebo ohybu, modulu pružnosti, případně za účelem snížení ceny finálního výrobku. Následné vlastnosti kompozitu jsou dány typem, koncentrací, tvarem a distribucí velikosti daného vyztužujícího materiálu.

Vlákna sama o sobě jsou schopná přenášet tahové zatížení, ale nedokáží držet požadovaný plošný tvar a snášet tlaková zatížení bez deformace. Avšak v momentě, kdy se vlákna skombinují s matricí a po vytvrzení vznikne kompozit, mění své mechanické vlastnosti. Vytvrzená matrice zajistí udržení požadovaného tvaru výrobku, a zajistí přenos tahových i tlakových sil do vláken, tím dojde k vzniku synergického efektu. To je efekt, kdy například pevnost v tahu výsledného kompozitu je větší než prostý součet pevností v tahu matrice a vlákna. Tento efekt je stěžejní pro konstrukci kompozitních výrobků, kdy erudovaný pracovník může navrhnout výrobek, který překračuje pevnostní vlastnosti konvenčních materiálů s rapidním snížením hmotnosti. [1]



Obr. 3. Synergický efekt [10]

3.1 Uhlíkové vlákno

Za první vyrobené uhlíkové vlákno lze považovat vlákno v Edisonově žárovce které, bylo vyrobeno z bambusu. Novodobá průmyslová výroba uhlíkového vlákna započala v roce 1957 pomocí pyrolýzy viskózy s výtěžností pouze 25%. Poté v roce 1971 začala firma Toray vyrábět uhlíková vlákna pomocí pyrolýzy polyakrylonitrilu (PAN). Tato technologie se s inovacemi používá pro výrobu uhlíkového vlákna do současnosti, a tvoří 90% objemu světové produkce.

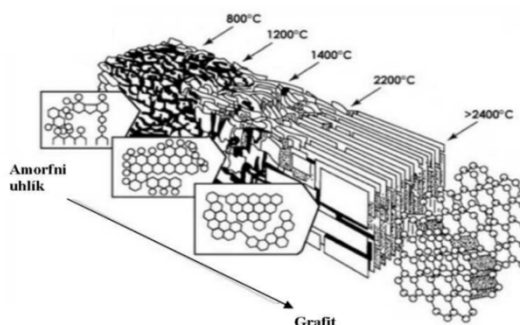
Uhlíkové vlákno se vyznačuje nejširším spektrem mechanických vlastností, a také malou měrnou hmotností, která se pohybuje od $1,8 \text{ g/cm}^3$ do 2 g/cm^3 . Bohužel reaguje s méně ušlechtilými kovy a při kontaktu s nimi koroduje. Proto je nutné uhlíkové vlákno vždy od kovu dělit nevodivou podložkou.

Základní vlastnosti uhlíkového vlákna:

Anizotropní chování vlákna - modul pružnosti v ose vláken je výrazně vyšší než kolmo na vlákna. Při kolmém zatížení je modul pružnosti obdobný hodnotám polykrystalického grafitu.

Křehkost - „prodloužení při zatížení je menší než u skelných vláken, minimální poloměr při ohýbání je proto větší než u skelných vláken“. [3,s.7 (vlákna)]

Koeficient roztažnosti - koeficient délkové roztažnosti α uhlíkových vláken je záporný. To znamená že při ohřevu se vlákna zkracují, ale ve směru kolmém k vláknům je koeficient roztažnosti α kladný a větší než u skelného vlákna. [1,3]



Obr. 4. Změna struktury vlákna PAN podle teploty výroby [3]

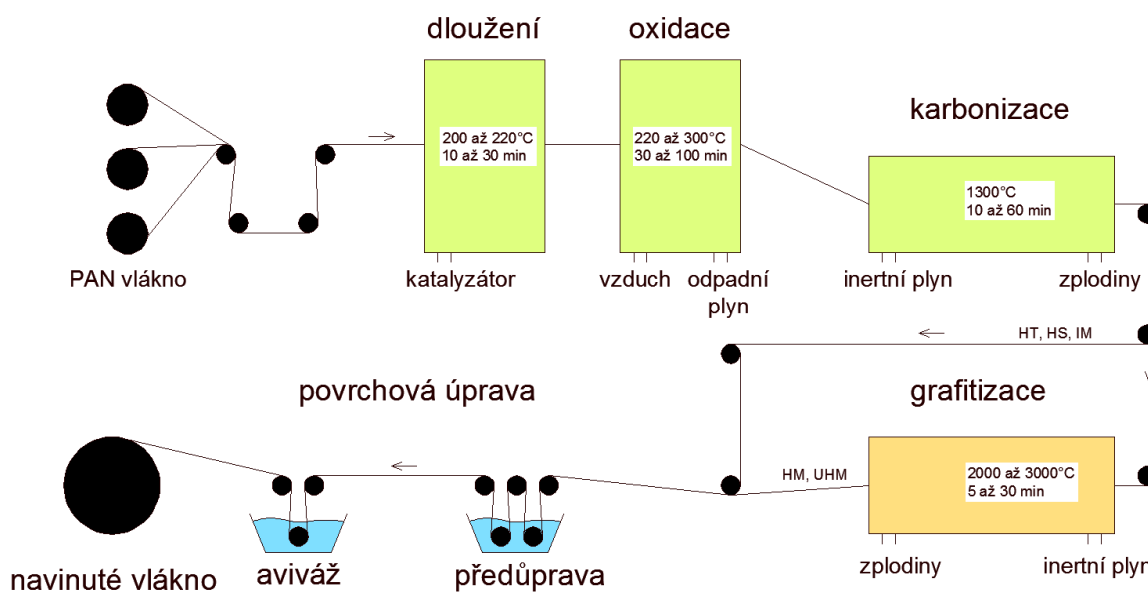
Výroba uhlíkových vláken:

Výroba uhlíkových vláken je obecně považovaná za pokročilý druh výroby vláken. Východzí suroviny jsou obvykle diametrálně odlišné od výsledného produktu. Jak je již výše uvedeno, uhlíková vlákna jsou v současnosti vyráběna pyrolýzou polyakrylonitrilu (PAN).

V prvním stupni jsou vlákna zahřívána a dlužena aby se docílilo požadované orientace molekul. Následně se stabilizují karbonizací. Jedná se o proces, při kterém je vlákno protahováno komorou o teplotě od 220°C do 300°C po dobu 30 - 100 minut za přítupu vzduchu. Díky tomu jsou vlákna také dehydrovaná.

Ve druhém stupni jsou vlákna protahována komorou s inertní atmosférou, která je obvykle tvořena dusíkem (N₂). Teplota komory je od 1 300°C do maximálně 1 600°C. Tím se PAN vlákno přemění na grafitickou strukturu s dobře usměrněnou uhlíkovou vrstvou po směru osy vlákna a to díky předchozímu dlužení. Takto vzniklý druh vláken se nazývá vysoko-
pevnostní (HS - high strength). Následně se vlákna ošetřují aviváží apod.

Dále je možný ještě třetí stupeň výroby, který HS - vlákna zahřívá na teploty nad 2 500°C v inertní argonové (Ar) atmosféře protahuje pod napětím po dobu 5 - 30 minut. Vzniklá struktura se blíží čistému grafitu a takto vzniklé vlákno se nazývá vysokomodulové (HM - High modulus). Vlákna mají sice menší pevnost, ale mají vyšší modul pružnosti. Vlákno má značné anizotropní vlastnosti . [1,3,12]



Obr. 5. Postup výroby uhlíkového vlákna z PAN [1]

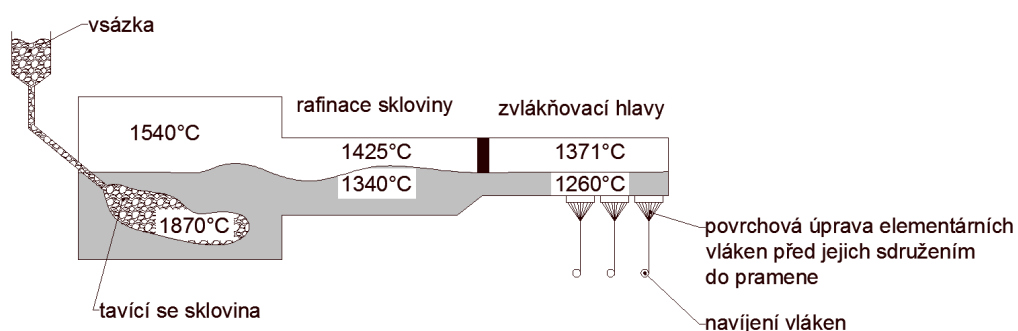
3.2 Skelná vlákna

Jsou speciálním druhem textilního vlákna jehož základ tvoří silikát (SiO_2). Vlákna mají pravidelný kruhový průřez, který je obvykle od $3,5 \mu\text{m}$ do $24 \mu\text{m}$. Jsou známé svou elektroizolační vlastností a vysokou propustností pro záření a také svou poměrně nízkou cenou.

Existuje několik modifikací skelných tkanin dle svých vlastností:

- E-vlákna - elektroizolační a prostop záření
- S-vlákna - pevnostní vlákna s větším obsahem SiO_2 , MgO a Al_2O_3 díky čemuž mají větší pevnost o 40% - 70% než E-vlákna. S-vlákna (USA) se také označují jako R-resistance (Evropa) nebo T-vlákna (Japonsko)
- C-vlákna - jsou odolné proti kyselinám a chemicky agresivním látkám. Používají se na desky tištěných spojů, v kosmonautice apod. jelikož dosahuje lepších dielektrických vlastností než E-vlákna [1]

Skelné vlákno se vyrábí pomocí tažení z trysek. Nejdříve se při teplotě cca $1\,400^\circ\text{C}$ roztaví směs křemičitého písku, vápence, kaolínu, dolomitu, kyseliny borité a kazivce na E-sklovinu. Následně se několik dnů směs čirí a je postupně transportována v tekutém stavu pomocí kanálek do předpecí a spřádacích trysek (bushings) Trysky jsou vyrobeny obvykle z platiny a obsahují 200 až 4000 otvorů, kudy protéká roztavená sklovina. Odkapávající vlákna mají průměr přibližně 2 mm a po opuštění trysky dopadají na rotující válec otáčející se rychlostí 50 m/s. Vlákna jsou tak odtahována a dlužena až o 40 000 násobek své původní délky a jejich průměr je poté $10 \mu\text{m}$. V průběhu tažení je na vlákna nanášena lubrikace která má formu vodní emulze a jejím úkolem je: spojit jednotlivá vlákna, chránit citlivý povrch elementárních vláken, zlepšit vazbu mezi pryskyřicí a vlákny při dalším zpracování. [1,3]



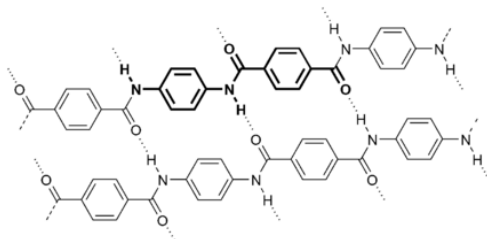
Obr. 6. Výroba skelných vláken [3]



Obr. 7. Nákres zvlákňovací hlavy [3]

3.3 Aramidová vlákna

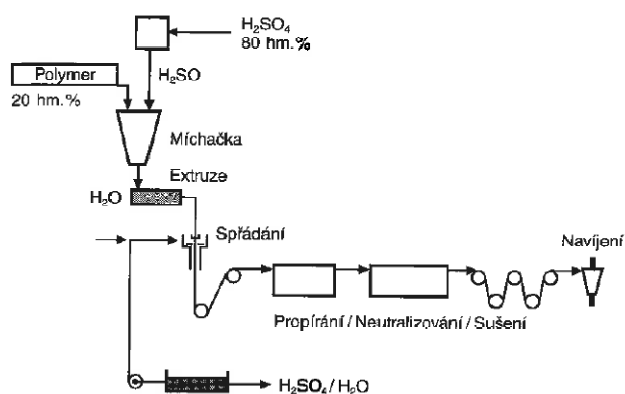
Jsou speciálním druhem vláken na bázi lineárních organických polymerů s orientací kovalentních vazeb ve směru osy vlákna. Proto vynikají vysokou pevností a tuhostí. Například vlákna o průměru 12 μm dosahují pevnosti v tahu 3 600 N/mm^2 , E-modulu 125 000 N/mm^2 . Tyto vlastnosti jsou dosaženy díky pravidelnému uspořádání fenolenových jader a amidových skupin vzájemně spojených vodíkovými můstky.



Obr. 8. Struktura aramidového vlákna [1]

Výroba aramidových vláken:

Výroba polyfenyltereftalamidových vláken pomocí spřádání z taveniny není možné z důvodu položení teploty tavení nad teplotou tepelného rozkladu. Vysoce krystalická vlákna se silně orientovanými molekulami se spřádají z vysoce viskózního 20% roztoku v koncentrované kyselině sírové. Následně se elementární vlákna spřádají do rovingů a poté se mnohokrát propírají a opatřují aviváží pro zlepšení zpracovatelnosti. [1]



Obr. 9. Diagram výroby aramidových vláken [1]

Vlastnosti:

- nejlehčí vyztužující vlákno s vysokou pevností v tahu
- anizotropní chování jako u uhlíkového vlákna, hodnota E - modulu je kolmo na vlákna mnohonásobně menší než ve směru osy vlákna
- mez pevnosti v tlaku v ose vlákna je několikanásobně menší než mez pevnosti v tahu
- vlákna jsou hydrofilní a jsou schopny absorbovat až 7% vlhkosti, proto je nutné je před zpracováním vysoušet
- při kontaktu s UV zářením dochází k poklesu pevnosti
- tepelná odolnost do 300°C
- adheze aramidových vláken k matrici je často nižší než u ostatních vláken
- kompozity vyztužené aramidovým vláknem se obtížně opracovávají [1]

Tabulka 2. Porovnání vybraných druhů vláken [1]

Druh vlákna	Hustota (g/cm ³)	Pevnost (MPa)	Modul (MPa)	Prodloužení (%)	Relativní cena ^(b)
Skelné	2,54	3 500	75 000	3 - 4	1
Uhlíkové ^(a)	1,78 - 1,81	3 800 - 6 530	230 000 - 400 000	1,78 - 1,81	19 - 40
Aramidové	1,44	3 600 - 4 100	131 000	-	18 - 25

- ^(a) Hodnoty závislé na typu vlákna (standardní, středně nebo vysokomodulová)

- ^(b) Relativní cena uhlíkových a aramidových vláken představuje příslušný násobek relativní ceny skelných vláken.

3.4 Přírodní vlákna

Jsou vlákna získaná z přírodních materiálů. Pro vyztužování plastu jsou vhodná pouze vlákna rostlinného původu, která mají jako základ celulózu. Patří sem například len, konopí, sisal, juta, ramie a bavlna. Mezi jejich přednosti patří odolnost proti stárnutí a čichová nezávadnost při změně počasí. Hlavní výhodou je tahová pevnost při poměrně nízkých hmotnostech. Nejpoužívanější přírodní vlákna jsou len (650 000 tun/rok) a juta (2 700 000 tun/rok).

Klady:

- nízká hustota
- malá abraze při mechanickém opracování
- likvidace pomocí spalování

Zápory:

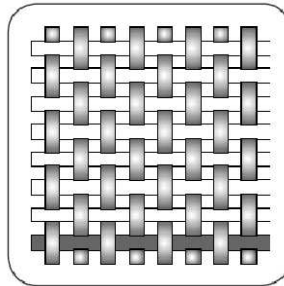
- závislost kvality vláken na podmínkách růstu
- citlivost na působení vlhkosti
- omezení volby matrice z důvodu rozkladu vláken působením teploty max 200°C
- vysoké náklady předúpravy před zpracováním pro lepší adhezi s matricí
- omezení délky vláken [1]

Tabulka 3. Porovnání vybraných přírodních vláken se skelným vláknem [1, s62]

Druh vlákna	Hustota (g/cm ³)	Pevnost (MPa)	Modul (MPa)	Prodloužení (%)
Skelné	2,54	3 500	75 000	4
Konopné	1,45	600	70 000	1,6
Lněné	1,48	750	30 000	2,0
Juta	~1,4	550	55 000	2,0
Sisalové	1,45	600	20 000	2,0

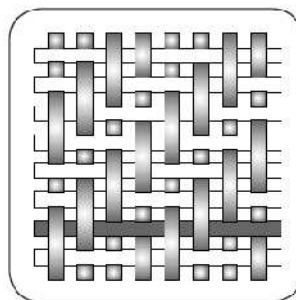
3.5 Druhy vazeb

Plátnová vazba - je druh vazby, kde jsou jednotlivé prameny kříženy a mají shodný počet v osnově i útku. Tento druh vazby se vyznačuje nejlepší pevností v obou směrech (v osnově i útku), ale zároveň i špatnou poddajností při výrobě tvarově složitých součástí. [1,3]



Obr. 10. Plátnová vazba [2]

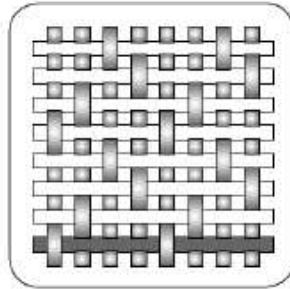
Keprová vazba - je tvořena křížením jednoho pramene v útku s minimálně dvěma prameny v osnově. A s každým následujícím pramenem v útku klesá místo průniku o jeden pramen v osnově. Výsledná vazba má texturu obdobnou šípu. Přesné počty pramenů v keprové vazbě udává její značení jako např.: 2/1, 2/2, 3/1. Kde první číslo udává počet pramenů v útku a druhé udává počet pramenů v osnově. Výsledná tkanina s keprovou vazbou se vyznačuje lepší ohebností než plátnová vazba, a to v případě že je použita měkká povrchová úprava vláken. [1,3]



Obr. 11. Keprová vazba [2]

Atlasová vazba - někdy také označovaná jako saténová se vyznačuje hladkým povrchem s dlouhými ploškami vláken. Obvykle je jeden pramen osnovy překryt pomocí čtyř a více pramenů v útku z horní strany a jedním pramenem ze spodní strany. Značení atlasové vazby je podle tzv. vaznosti, která se obvykle pohybuje v rozmezí 5-6 a udává počet pramenů v osnově překrytých pomocí útku. Tato vazba dokáže ve výsledném kompozitu dosáhnout

velkého podílu vláken vůči matici se zaručením minimálního zvlnění. Výsledný kompozit se také vyznačuje větší pevností a tuhostí než ostatní vazby ale pouze ve směru útku. [1,3]



Obr. 12. Atlasová vazba [2]

3.6 Produkty z vláken

Sekané prameny - nahodile orientovaná vlákna délky např. 3 mm až 13 mm používané ve formě rohože pro ruční kladení za mokra, nebo ve formě sekaného vlákna při nanášení pomocí stříkání. Forma vlákna je vhodná na výrobu tvarově složitých součástí.



Obr. 13. Sekané prameny [11]

Mletá vlákna - vlákna o délce např. 0,1 mm až 0,2 mm používaná pro zlepšení mechanických vlastností, nebo v případě uhlíkového vlákna pro svod elektrostatického náboje.



Obr. 14. Mleté vlákna [11]

Prameny - vyztužující vlákno ve formě nekonečného pramenu používané při výrobě pomocí pultruze nebo navíjení na trn.



Obr. 15. Pramen skelného vlákna [11]

Tkaniny - plošná výztuž s opakující se počtem vláken v osnově a útku. Materiál vláken je shodný. Tkaniny se používají pro výrobu plošných kompozitních výrobků.



Obr. 16. Skelná tkanina s plátňovou vazbou [11]

Hybridní tkaniny - jedná se o druh tkaniny, která má rozdílný druh materiálu vláken v osnově a útku. Používá se například kombinace uhlík a aramid pro dosažení vysoké pevnosti ale také k snížení tříštivosti v případě lomu. Aramidová vlákna zajišťují houževnatý lom v případě porušení.



Obr. 17. Hybridní tkanina uhlík a aramid s keprovou vazbou [11]

4 VÝROBA KOMPOZITNÍCH SOUČÁSTÍ

Kompozitní výrobky se vyrábějí pomocí širokého spektra výrobních technologií, které vznikaly při rozvoji kompozitních materiálů. V průběhu technologického pokroku docházelo k vývoji nových výrobních technologií, které urychlují a zkvalitňují výrobu součástí. Hnací silou vývoje je požadavek na snížení nákladů na výrobu, snížení hmotnosti součástí, zlepšení mechanických vlastností kompozitu a zlepšení reprodukovatelnosti kvality výrobků. Zlepšením kvality dochází k čím dál častějšímu využívání kompozitních materiálů v leteckém i automobilovém průmyslu, kde je stále více kladen důraz na snížení hmotnosti a zlepšení pevnosti oproti konvenčním materiálům. [3]

4.1 Pomocné materiály

Jsou materiály, které jsou potřebné při výrobě kompozitních výrobků. Každá technologie má své specifické materiály, které se v některých případech prolínají do dalších technologií. Slouží pro hladký průběh výroby a docílení co nejlepší kvality vyráběného materiálu. Bohužel obvykle tvoří velmi drahou část výroby a v některých případech jsou opakovaně nepoužitelné. Po výrobě jednoho dílu se tedy vyhazují. Níže jsou popsány nejčastěji se vyskytující pomocné materiály, které budou v kapitole 4.2. zmiňovány při popisu jednotlivých výrobních metod. [2,3]

4.1.1 Odsávací rohož

Je netkaná textilie, která se primárně používá při lisování pod vakuem k odsátí přebytečné matrice z kompozitu. Jejím dalším účelem je odsátí vzduchových bublin z kompozitního výrobku. Je charakterizována teplotní odolností a plošnou gramáží. [2,3]



Obr. 18. Odsávací rohož [11]

4.1.2 Vakuovací folie

Je speciální vzduchotěsná folie, která hermeticky uzavírá celý systém a po vyvození vakua způsobí tlak na horní část plochy výrobku. Každá folie má své specifické parametry, které závisí na druhu vyráběného dílu. Nejčastěji se folie vybírá dle teplotní odolnosti, chemické odolnosti a celkové kompatibility s vakuovanými materiály. Dalším aspektem použití je flexibilita a pevnost v tahu. Při výrobě se její rozměr volí o 30 % až 40 % větší než je plocha výrobku, v závislosti na složitosti vyráběného dílu. V případě volby malé folie, může při výrobním procesu dojít k nadrozměrnému protažení s následným vznikem trhlin, které způsobí netěsnost systému. Tloušťka folie je obvykle od 50 μm – 125 μm . Šířka se pohybuje od 1 m do 4,5 m v případě speciálních řešení i více dle potřeby výroby. [2,3]



Obr. 19. Vakuová folie při výrobě dílu [13]

4.1.3 Separační folie

Slouží k oddělení odtrhové tkaniny od ostatních komponentů výrobního systému. Jedná se o přesně perforovanou folii, která zaručí odtok přebytečné matrice z kompozitu do odsávací rohože. Ve výrobním systému se volí dle teplotní odolnosti, flexibility, kompatibility s výrobním systémem a primárně dle druhu perforace. [2,3]



Obr. 20. Separační folie [2]

4.1.4 Distribuční media - sítě

Distribuční media jsou materiály, které slouží pro rozvod matrice po kompozitním výrobku při výrobě pomocí vakuové infuze. Kromě rozvádění matrice po suché tkanině, slouží pro urychlení toku matrice v kompozitu. Jedná se o extrudované sítě, které se volí dle třech parametrů. Určujícími parametry jsou rychlost toku matrice, teplotní odolnost a tvárnost. [2,3]



Obr. 21. Fotografie distribučních sítěk Airtech [2]

4.1.5 Odrhová tkanina

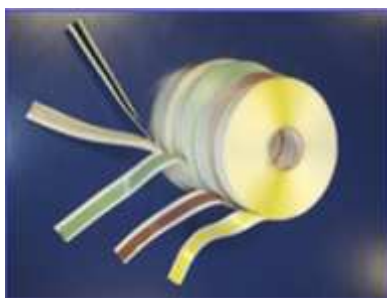
Je speciální druh textilie například z PA64. Aplikuje se na vrstvy tkaniny tvořící výrobek. Jejím úkolem je po vytvrzení kompozitu oddělit ostatní pomocné materiály z výrobku. Po jejím odtržení na povrchu výrobku vznikne čistý texturovaný povrch bez přebytečné matrice. Tím také dochází k přípravě povrchu pro následné technologické operace, jako jsou lakování, lepení, nebo kladení další vrstvy laminátu. Tkanina se volí dle třech základních parametrů: teplotní odolnosti, tvarovatelnosti a rychlosti toku matrice. [2,3]



Obr. 22. Odrhová tkanina[11]

4.1.6 Těsnící páska

Těsnící páska slouží k vzduchotěsnému spojení folie s povrchem formy. Dále se využívají pro utěsnění pomocných ventilů a hadic ve vakuovém systému. Obvykle jsou vyráběny z materiálu na bázi butylu. Při výrobě se volí s ohledem na tepelné odolnosti, a také přilnavosti k povrchu. [2,7]



Obr. 23. Těsnící páska [2]

4.1.7 Vakuové ventily, hadice a spojky

Pro vzduchotěsné uzavření celého systému a následné vyvození vakua jsou potřebné následující komponenty. Vakuové ventily pro spojení hadic vedoucích z formy k vývěvě, případně k zásobníku matrice. Pro rychlé spojení vakuových hadic s vývěvou a zásobníkem vakua se používají vakuové spojky. Jako zásobník přebytečné matrice slouží zásobník vakua, který také zaručí, aby odsávaný vzduch do vývěvy byl bez jakýchkoliv zbytků matrice. Zásobník vakua je obvykle vybaven vakuometrem, aby bylo možné kontrolovat podtlak v systému, případně určit, zda nejsou v systému netěsnosti. Poslední komponentou je vakuová vývěva, která v celém systému vytváří vakuum. Pro kontrolu těsnosti se ve velkých podnicích využívá ultrazvukový detektor netěsností. Jeho pořizovací náklady jsou však velmi vysoké. [2,3]



Obr. 24. Pomocné materiály [11]

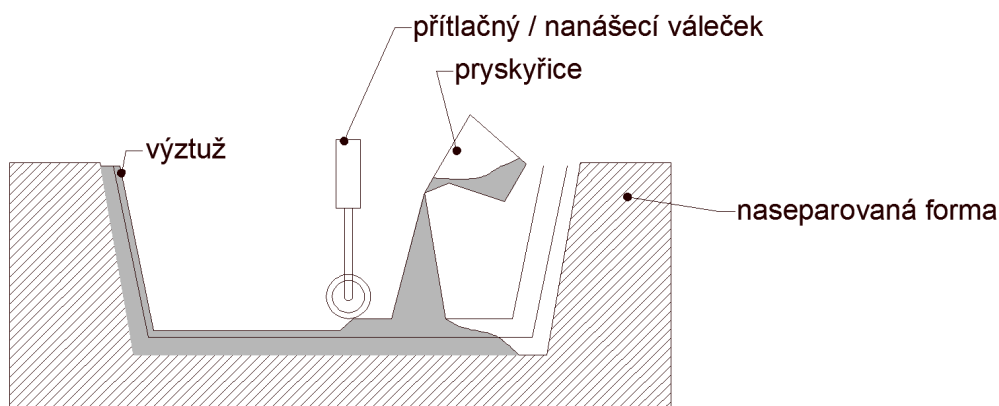
4.2 Výrobní metody

Pro zpracování kompozitních materiálů existuje několik výrobních metod. Každá metoda vznikala průběhem času v návaznosti na požadavky trhu, jako např.: cena výroby a výrobku, kvalita, reprodukovatelnost, přesnost apod. Proto jsou níže v kapitole 4.2.1. - 4.2.4. uvedeny nejvíce používané metody, kdy některé z nich budou použity pro výrobu vzorků v praktické části této diplomové práce.

4.2.1 Ruční kladení za mokra

Ruční kladení je nejjednodušší technologií výroby kompozitních výrobků, kterou je možné v dobré kvalitě provádět i v méně vybavené dílně. Pro výrobu je nutné mít formu, která má negativní, nebo pozitivní tvar výrobku. Prvním krokem je ošetření formy pomocí separátoru. Na naseparovaný povrch se nanese gelcoat nebo první vrstva pryskyřice pro vytvoření hladké pohledové vrstvy výrobku, která zároveň po vytvrzení chrání vlákna proti vnějším vlivům. Následně se na nanesenou vrstvu pryskyřice položí první vrstva výztuže, kterou prosytíme a zároveň vytvarujeme pomocí tlaku válečkem, nebo štětcem, kterým vytlačíme přebytečnou pryskyřici a vzduchové bubliny. Poté opět nanese další vrstvu pryskyřice a opakujeme předchozí krok s kladením vrstvy a vytlačáním vzduchových bublin dokud nedocílíme požadovaného počtu vrstev. Je však nutné myslet na tzv. geltime (doba želatinace) pryskyřice, jelikož po jeho uplynutí již není možné s pryskyřicí pracovat.

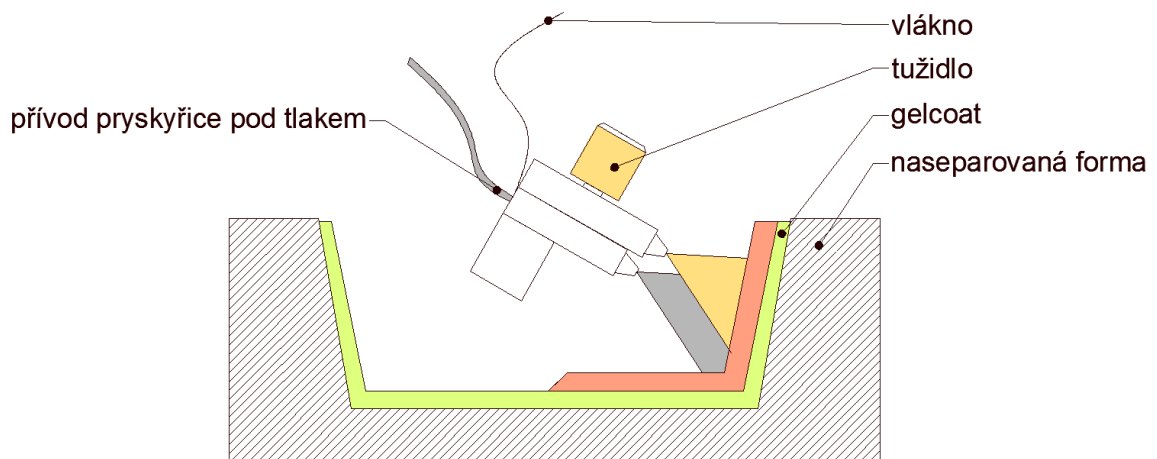
Výsledná kvalita výrobku je velmi závislá na zručnosti pracovníka a reprodukovatelnost stálé kvality je obtížná. Metoda je vhodná pro výrobu málo namáhaných dílů, jelikož při ručním kladení není zaručeno rovnoměrné prosycení tkaniny a nedochází k maximální eliminaci vzduchových bublin uzavřených v kompozitu. [2,3,14]



Obr. 25. Ruční kladení za mokra [14]

4.2.2 Stříkání

Jedná se o inovaci ručního kladení s možností větší produktivity práce při výrobě rozměrných tvarově složitých součástí. Na naseparovanou formu se nanese ručně nebo pomocí stříkací pistole gelcoat a nechá se vytvrdit. Může se nanášet více gelcoatu dle požadavku tloušťky. Po vytvrzení se na gelcoat nanese pomocí speciální stříkací pistole pryskyřici s výztuží. Do pistole jde vlákno, které je uvnitř nasekané a pomocí trysky foukané na formu. Z druhé trysky je rozprašováno tužidlo, které při kontaktu s pryskyřicí vyvolá vytvrzovací proces. Touto metodou se vyrábí tvarově složité součástky o velkých rozměrech, jako jsou například vířivky apod.



Obr. 26. Nanášení pomocí stříkání [14]

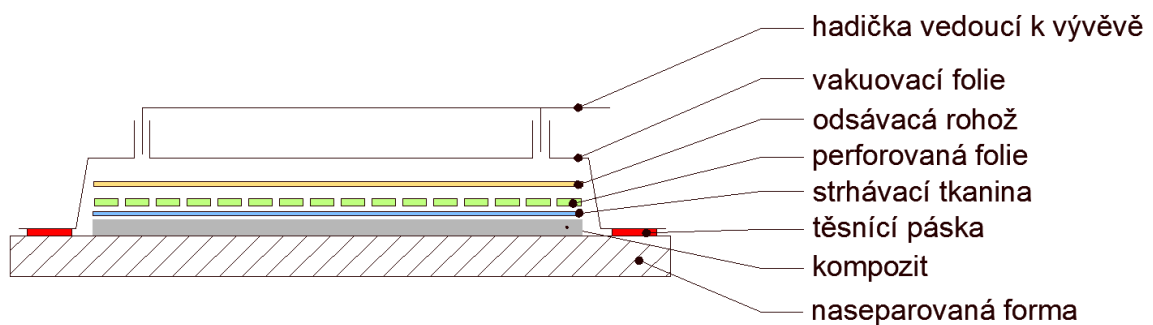
4.2.3 Ruční kladení s dolisováním pod vakuovou folii

Ruční kladení s dolisováním pod vakuovou folií, nebo také nazývané ruční kladení s dolisováním (zkrácený výraz použitý v diplomové práci) Jedná se o inovaci metody ručního kladení, kdy ručně provedeme nanesení vrstev jako u ručního kladení za mokra viz. kapitola 4.2.1. První změna této metody je v konstrukci formy, kde musíme myslet na větší přesahy hran pro usazení vakuovací folie.

Po nanesení a prosycení požadovaného počtu vrstev výztuže, položíme odtrhovou tkaninu, která nám oddělí finální výrobek od ostatních pomocných materiálů. Následně položíme separační folii a na ni odsávací rohož, která zabezpečí odsátí přebytečné pryskyřice z výztuže. Poté celý výrobek překryjeme vakuovací folií s ventilem a vše dotěsníme k formě pomocí těsnící pásky. Na ventil je napojená hadice vedoucí do zásobníku vakua a následně do vakuové vývěvy. Poté se spustí vývěva, která generuje podtlak -0,6 až -1 bar v systému,

dokud neuplyne čas zpracovatelnosti pryskyřice. V důsledku podtlaku dochází k vytlačení přebytečné pryskyřice a vzduchu z výrobku. Opět je však nutné vše stihnout dříve, než dojde k želatinaci pryskyřic. Po uplynutí doby želatinace pryskyřice by neproběhl přesun přebytečné pryskyřice a vzduchových bublin pryč z výrobku do odsávací rohože.

Metoda je vhodná pro malosériovou výrobu namáhaných dílů s požadavkem na co nejlepší kvalitu. Z důvodu dolisování při podtlaku je možné kvalitu výrobku lépe reprodukovat. Výsledná kvalita je také méně závislá na předchozích krocích při kladení vrstev. [2,3,14]



Obr. 27. Ruční kladení s dolisováním [14]

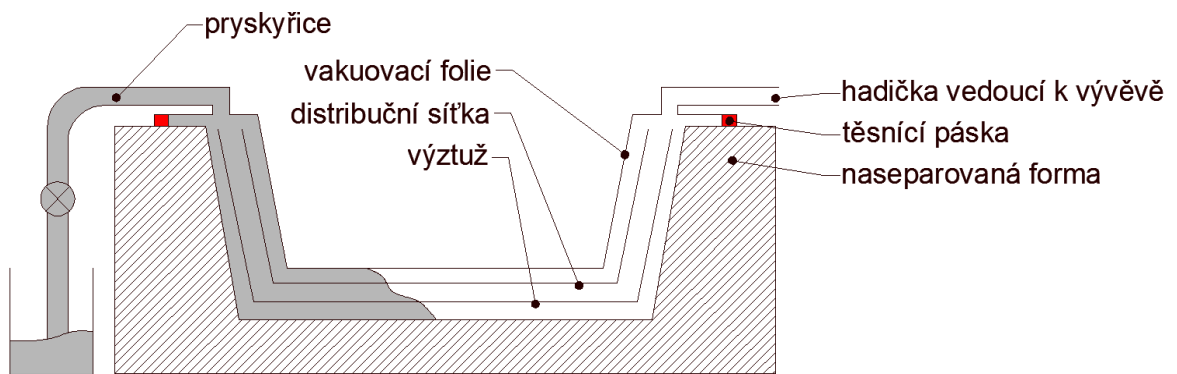
4.2.4 Vakuová infuze

Výroba pomocí vakuové infuze je „relativně“ jednoduchá, avšak časově náročnější než ruční kladení za mokra. Využívá se pro výrobu kvalitních kompozitních dílů, nebo sendvičových struktur. Princip spočívá ve vytvoření podtlaku ve formě a nasátí pryskyřice do výztuže.

Na naseparovanou formu s přesahy (pozn. přesahy nesmíme ošetřit separátorem) položíme požadovaný počet vrstev výztuže. Následně na vrstvy výztuže položíme odtrhovou tkaninu, na kterou položíme distribuční síťku. Okolo výrobku ve vzdálenosti 3-5 cm osadíme spirálovou bužírku pro rozvod vzduchu (hadičky se šroubovým prořezáním) a v jednom místě ji spojíme s konektorem vedoucím do zásobníku vakua s vývěvou. Poté si připravíme folii s větším rozměrem o cca 30 % - 40 % větší než je forma aby vlivem podtlaku nedošlo k jejímu roztržení. Po jejím obvodu nalepíme těsnící pásku. Doprostřed výrobku vložíme vtokové ústí. Poté na celou formu položíme připravenou folii a důkladně ji dotěsníme k formě pomocí nalepené těsnící pásky. Dále si v místě připraveného vtokového ústí prořízneme otvor ve folii a osadíme hadičku, která povede do zásobníku pryskyřice. Taktéž je nutné hadičku velmi dobře utěsnit pomocí těsnící pásky. Následně provedeme test těsnosti formy, tím že zaškrtneme hadičku, která povede do zásobníku a spustíme vývěvu. Na tlakoměru sledujeme hodnotu podtlaku, který v případě správné těsnosti narůstá a v určitém

momentu zůstane konstantní na úrovni -0,6 až -1 bar. Pokud je test úspěšný, připravíme si pryskyřici do zásobníku, ponoříme do ní nasávací hadičku a spustíme vývěvu. Podtlakem dojde k prosycování výztuže a přebytečná pryskyřice je odsávána do zásobníku vakua. Jakmile přestanou v hadičce vedoucí do zásobníku vakua proudit vzduchové bubliny, nebo nastane čas želatinace pryskyřice, uzavřeme přívod ze zásobníku pryskyřice a hadičku utěsníme (pozn. přelomením a stlačením pomocí zaškrcovacích kleští) chvíli ještě necháme běžet vývěvu a po cca 10 minutách ji také vypneme. Druhý den po vytvrzení pryskyřice odstraníme veškeré pomocné materiály, provedeme odformování a máme hotový výrobek.

Tato metoda je při dodržení stanoveného postupu velmi jednoduchá, avšak je nutné pracovat precizně a s rozvážností. Bohužel jejím velkým úskalím je vysoká cena vývěvy a pomocných materiálů. Je vhodná pro výrobu sendvičových struktur nebo velmi rozměrných výrobků jako jsou např. lodě. Před výrobou složitých součástí se provádí simulace pomocí PC softwaru. [2,3,14]



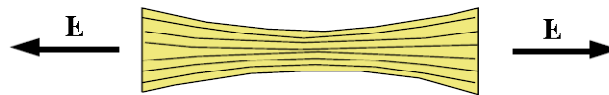
Obr. 28. Vakuová infuze [14]

5 ÚVOD DO MECHANIKY KOMPOZITŮ

5.1 Druhy namáhání

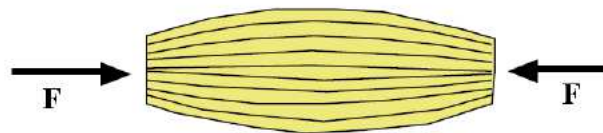
Tak, jako většina konstrukčních materiálu, tak se i kompozity podrobují mechanickým zkouškám. Důvodem je zjištění vhodné skladby kompozitního materiálu dle potřebné aplikace. Mezi základní zatížení můžeme zahrnout tah, tlak, ohyb a smyk. Níže je uvedeno několik základních informací o chování kompozitů vůči zatížení. [6]

Tah - při zatěžování kompozitů tahem, dochází k tahovému napětí ve vláknech a celková tuhost výrobku závisí na jejich vlastnostech. Tahové zatížení je do vláken přenášeno pomocí matrice. Proto na kvalitě prosycení a defektech ve struktuře závisí výsledná pevnost výrobku. [6]



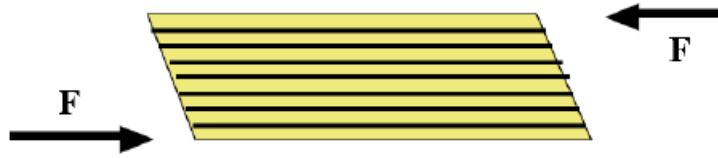
Obr. 29. Tahové zatížení [6]

Tlak - v případě zatěžování kompozitu tlakem je hlavním členem matrice, která drží vlákna pohromadě. V momentě, kdy dochází k porušení matrice, dochází k delaminaci a následně ke zborcení struktury, čímž se měření stává neplatné. Porušení způsobeného smykem, které se projevuje jako zlom pod úhlem 45°, se považuje za relevantní výsledek zkoušky. Koncentrací napětí jsou špatně prosycená místa, nebo vzduchové bubliny. [6]



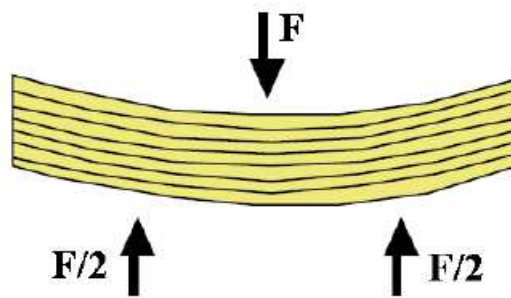
Obr. 30. Tlakové zatížení [6]

Smyk - při zatěžování smykem mají vrstvy tendenci po sobě navzájem klouzat. Hlavním aktérem zatížení je matrice, která plní funkci pojiva a přenáší zatížení do výztuže. Proto celková smyková tuhost je závislá na mechanických vlastnostech matrice po vytvrzení. [6]



Obr. 31. Smykové zatížení [6]

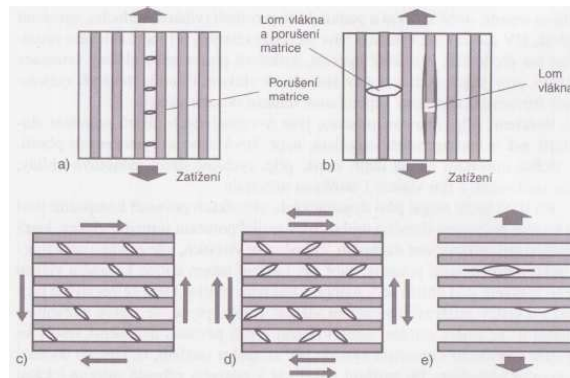
Ohyb - ohybové namáhání je kombinace tahového, tlakového a smykového zatížení. Horní strana je namáhána tlakem, spodní část tahem, a v centrální části dochází k zatěžování smykem. [6]



Obr. 32. Ohybové zatížení [6]

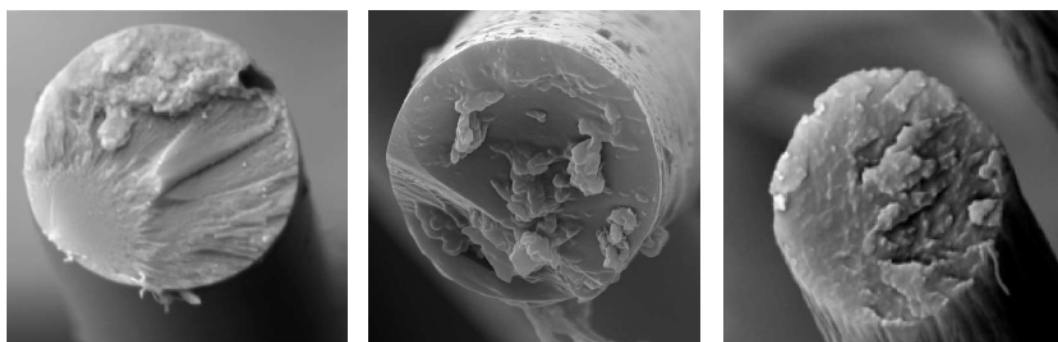
5.2 Mechanismy porušování kompozitů

Mechanismu porušování závisí na orientaci vláken ve výrobku. Jednosměrně orientovaná vlákna lépe snáší tahové zatížení, a při vícesměrném zatížení hrozí menší porušení mezi-lamelárních vrstev, než u vícesměrně orientovaných výztuží. Dalším ohniskem vzniku poruch může být uspořádání vláken, vzduchové bubliny a nedostatečná adheze složek. [4]



Obr. 33. Vznik trhlin v jednosměrně orientovaném výztuží v závislosti na způsobu zatížení [1]

Následný způsob poškození vláken je závislý i na druhu vláken. Vlákná jako je například skelné, uhlíkové nebo keramické, mají charakteristický křehký lom. Lom je iniciován defektem v matrici, kde dochází ke koncentraci napětí, které má za následek lom vláken a šíření trhliny do okolí. [4]



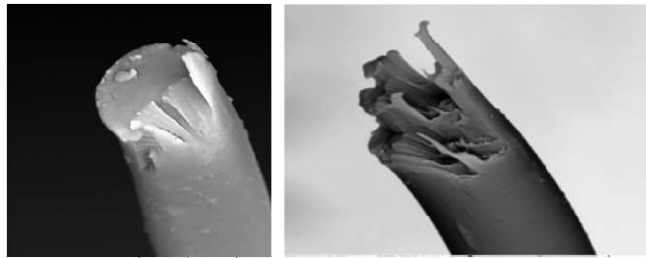
a) skelné vlákno

b) keramické vlákni

c) uhlíkové vlákno

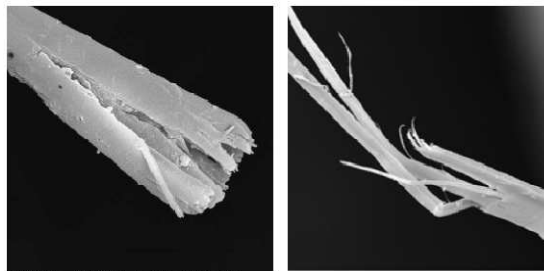
Obr. 34. Vlákná s křehkým lomem [4]

V případě většiny vláken synteticky zvlákňovaných z taveniny dochází k houževnatému lomu. [4]



Obr. 35. Syntetická vlákna s houževnatým lomem [4]

V případě vysocepevných vláken, jako je kevlar a Nomex (aromatické polyamidy), dochází k axiálnímu štěpení. [4]



a) kevlar

b) nomex

Obr. 36. Axiální štěpení vysocepevných vláken [4]

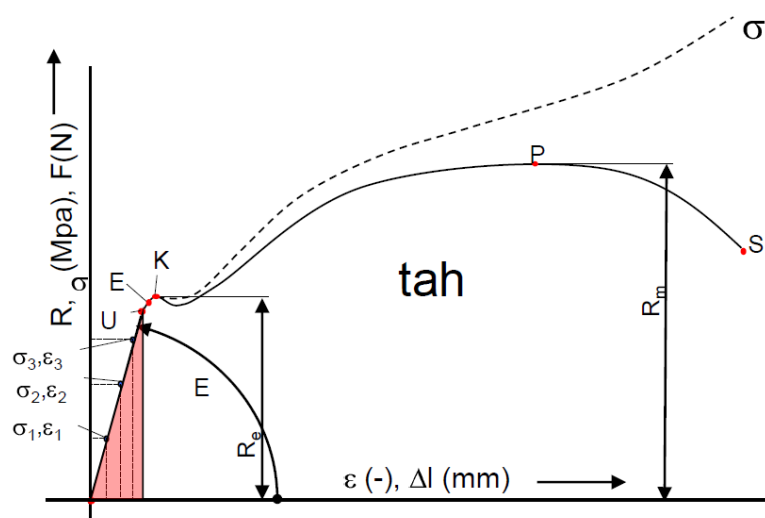
5.3 Mechanické zkoušky

Mechanické zkoušky slouží pro určení chování materiálu vůči určitému druhu zatížení při určité situaci. Proto existují zkoušky krátkodobé i dlouhodobé, a dále jednorázové nebo cyklické. Z důvodu velké rozmanitosti chemického i morfologického složení kompozitu, je obtížné určit všechny podmínky a zkoušky pro tyto materiály. Normy, které existují rámcově, určují zkušební podmínky apod. Každá aplikace kompozitu má svá specifika, takže se pro konkrétní aplikaci doporučují zkoušky dle uvážení konstruktéra. Nicméně většina zkoušek zkoumá vliv působení síly na zkušební těleso v daném prostředí (teplota / tlak / chemické vlivy apod.).

5.3.1 Zkouška Tahem

Pro zkoušku tahem u kompozitních materiálů existuje mnoho geometrií a tvarů zkušebních těles. Přesné tvary jsou popsány například v normě ČSN EN ISO 527-1 až 5, které zohledňují stavbu kompozitu. Přesné parametry zkušebních těles v závislosti na formě výztuže jsou popsány ve výše uvedených normách.

Pro měření se používá zatěžující rychlost v milimetrech za minutu. Maximální deformace nesmí přesáhnout 0,5 %, aby oblast vzniku deformace neovlivnila zkoušku. Na příslušném trhacím diagramu, který je grafickým výstupem měření, se zakresluje závislost zatěžující síly F [N] na změně délky ΔL [mm]. Ve strojírenské praxi se používá tzv. smluvní diagram, kdy hodnoty napětí jsou vztaženy k původnímu průřezu zkušebního tělesa. [15,16]



Obr. 37. Diagram zkoušky tahem [15]

Používané hodnoty z tahového diagramu:

- **σ_{Mt} - pevnost v tahu.** Nebo také nazývaná mez pevnosti v tahu. Jedná se o maximální, napětí které zkušební vzorek snesl.

$$\sigma_{Mt} = \frac{F_{max}}{S_0} \text{ [MPa]}$$

kde F_{max} je podíl maximální zatěžující síly, S_0 původní průřez vzorku

- **R_e - pevnost v kluzu.** Je napětí, při kterém dochází k razantnímu protažení zkušební tělesa bez zvýšení nebo dokonce s poklesem zatěžující síly.

$$R_e = \frac{F_k}{S_0} \text{ [MPa]}$$

- **ε - poměrné prodloužení.** Je poměr změny délky původního tělesa k původní délce tělesa L_0 .

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \text{ [-]}$$

kde $\Delta L = L_u - L_0$

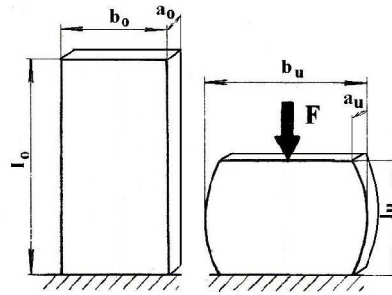
- **A - tažnost.** Je hodnota udávající v procentech poměrné prodloužení
 $A = \varepsilon \cdot 100\% \text{ [%]}$
- **U - mez úměrnosti.** Do meze úměrnosti je napětí přímo úměrné deformaci. V diagramu je tvořena přímkou spojující bod 0 a U. Platí tzv. Hookův zákon $\sigma = E \cdot \varepsilon$.
- **E - mez pružnosti.** Je smluvní hodnota napětí způsobující trvalou deformaci. Pro praxi se jedná o hodnotu, jež se obtížně zjišťuje. Proto se stanovuje jako napětí způsobující trvalou deformaci o velikosti 0,0005 % L_0 .
- **K - mez kluzu.** Napětí, při kterém se zkušební těleso začne výrazně prodlužovat bez zvyšování zatěžující síly. Případně za poklesu zatěžující síly. Smluvně se bere mez kluzu jako trvalé prodloužení o 0,2 %.
- **P - mez pevnosti.** Maximální napětí, které zkušební vydrželo.
- **S - přetržení.** Dojde k prasknutí zkušební tělesa

[15,16]

5.3.2 Zkouška Tlakem

Z důvodu možnosti ztráty stability vyztuženého výrobku při tlakové zkoušce, se musí zkušební těleso velmi pečlivě navrhovat. Proto je vhodné zvolit těleso ve tvaru válce nebo trubky, případně pravoúhlá prizmata.

Při zkoušce může dojít k delaminaci, která je způsobená špatnou adhezí vláken. V případě dobré adheze dochází k lomu vlivem smyku. Pro potlačení možnosti delaminace se používají přípravky, které zamezují vybočení zkušebního tělíska. Z tohoto důvodu je zkouška tlakem velmi náročná a plochy, které způsobují vnější zatížení musí být rovnoběžné a zcela rovné. Taktéž i zkušební těleso musí mít konstantní tloušťku, jinak může dojít k ztrátě stability.



Obr. 38. zkušební vzorek před a po zkoušce tlakem [17]

Používané hodnoty ze zkoušky tlakem:

- **σ_{Md} - pevnost v tlaku.** Je maximální hodnota zatěžující síly F_{max} v momentě, kdy dojde k porušení nebo stlačení zkušebního tělesa na určitou hodnotu, vztažená k původnímu průřezu.

$$\sigma_{Md} = \frac{F_{max}}{S_0} \text{ [MPa]}$$

kde F_{max} je podíl maximální zatěžující síla, S_0 původní průřez vzorku

- **A_t - poměr zkrácení.** Je poměr zkrácení zkušebního tělesa $\Delta L = l_0 - l_u$ k původní délce zkušebního tělesa H_0 .

$$A_t = \frac{\Delta h}{h_0} \cdot 100 \text{ [%]}$$

- **Z_t - poměr příčného rozšíření.** Je poměr změny průřezu zkušebního tělesa $\Delta S = S_u - S_0$ k původnímu průřezu zkušebního tělesa S_0 .

$$Z_t = \frac{\Delta S}{S_0} \cdot 100 \text{ [%]}$$

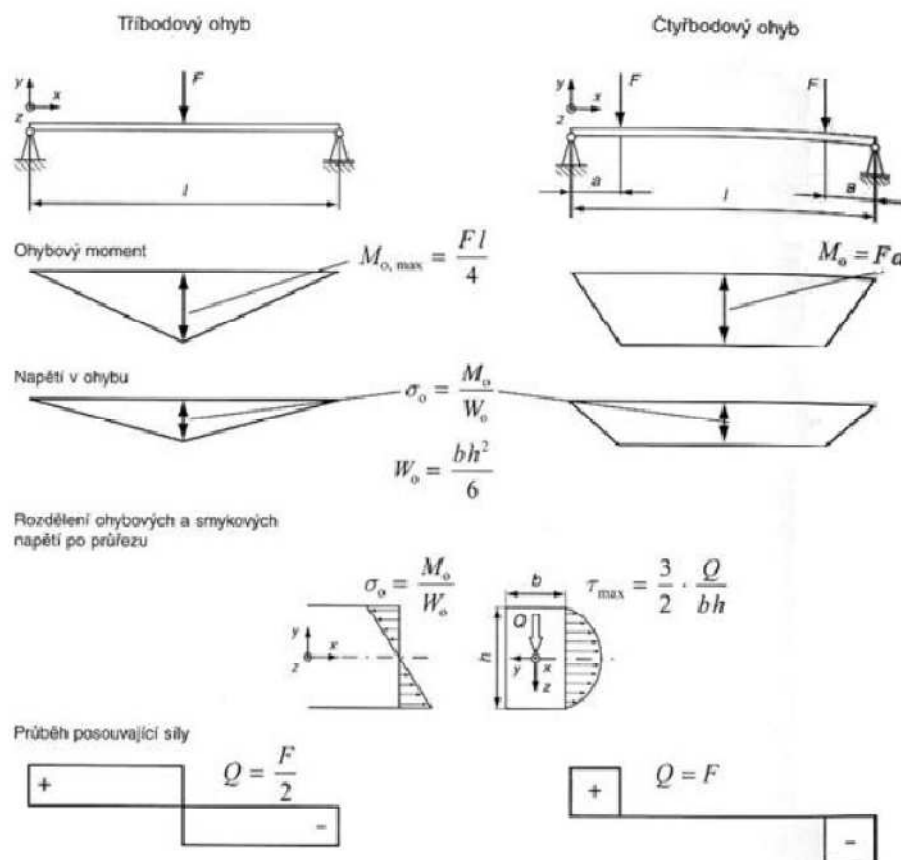
[15,16]

5.3.3 Zkouška Ohybem

Pomocí ohybové zkoušky zjišťujeme pevnostní a elastické charakteristiky zkoušeného materiálu. Pro správné měření se předpokládá rovnoměrné rozložení napětí v průřezu zkušební tělesa. Proto jsou také hodnoty pevnosti v ohybu u kompozitu silně závislé na vzdálenosti vláken od neutrální osy.

Existuje zkouška trojbodovým, nebo čtyřbodovým ohybem. V případě čtyřbodového ohybu je po celé délce konstantní ohybový moment M_o , což je velmi významné pro zjištění modulu pružnosti v ohybu. V případě zkoušky trojbodovým ohybem dochází k velkému zatěžování v místě lomu - uprostřed délky zkušební tělesa. Největší smykové napětí je uprostřed mezi vrstvami tělesa.

Získané hodnoty slouží primárně pro srovnání, taktéž je však nutné zjistit způsob porušení. Jediný dovolený druh porušení při ohybové zkoušce je lom zkušební tělesa vyvolaný tahem nebo tlakem.



Obr. 39. Průběh ohybového momentu trojbodový, čtyřbodový ohyb [1]

Používané hodnoty ze zkoušky ohybem:

- **σ_{max} - pevnost v ohybu.** Je největší napětí, které zkušební těleso uneslo, a dochází při něm k přelomení zkušební tělesa.

$$\sigma_{max} = \frac{M_{omax}}{W_o} \text{ [MPa]}$$

kde ohybový moment $M_{omax} = \frac{F \cdot l}{4}$ [Nmm] a model průřezu v ohybu je pro obdél-

níkový průřez $W_o = \frac{b \cdot h^2}{6}$ [mm³]

- **φ - poměrný průhyb.** Je poměr maximálního průhybu v okamžiku lomu y_p uprostřed délky zkušební tělesa a celkovou délkou zkušební tělesa L.

$$\varphi = \frac{y_p}{L} \cdot 100[\%]$$

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem práce je provést výrobu kompozitních desek za pomoci vybraných výrobních technologií, a následně porovnat jejich kvalitu, mechanické vlastnosti a výrobní složitost. Z důvodu získání vhodných výsledků bylo rozhodnuto o výrobě desek pomocí tří technologií. Kritéria jejich výběru byla: potřebné vybavení v laboratoři na UTB, možnost užití shodné pryskyřice i výztuže při výrobě.

První z využitých metod je ta nejzákladnější, a to metoda ručního kladení za mokra, kterou je možné provádět i v méně vybavené dílně. Druhou z metod je ruční kladení s dolisováním, jako poslední byla zvolena vakuová infuze. V případě využití metody ručního kladení s dolisováním a infuze, je nutná vakuová vývěva a pomocné materiály, které budou níže popsány.

U vybraných metod je tedy možné použít stejnou epoxidovou pryskyřici i vyztužující vlákno. Pro výzkum vlivu výrobních technologií na různé druhy vláken bylo rozhodnuto, že budou vyrobeny desky z uhlíkové tkaniny Kordcarbon CC600 - 600g/m² a skelné Aeroglass 200g/m² tkaniny.

Před započítím je předpokládáno, že nejlepší kvality budou dosahovat vzorky vyrobené pomocí vakuové infuze nebo ručního kladení s dolisováním. Metoda ručního kladení bude taktéž dosahovat dobré kvality, ale výsledky budou pravděpodobně nestálé, jelikož není možné zaručit konstantní stlačení vrstev a prosycení. Kdežto při ručním kladením s dolisováním bude zaručeno konstantní stlačení a odstranění přebytečné pryskyřice. V případě vakuové infuze je hlavním aspektem, který ovlivní kvalitu výrobku, položení celého systému a dokonalé utěsnění. Vakuum následně zaručí dostatečné stlačení a prosycení vrstev bez přebytečné pryskyřice, a odstraní případné vzduchové bubliny.

Shrnutí cílů práce:

- 1) Návrh materiálového složení zkušebních vzorků
- 2) Návrh použití výrobních technologií pro porovnání kvality
- 3) Výroba zkušebních těles za pomoci zvolených technologií
- 4) Experimentální testování zkušebních vzorků a porovnání naměřených hodnot
- 5) Porovnání časové a finanční náročnosti výroby
- 6) Diskuze výsledků měření

7 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Výroba desek probíhala v období říjen až listopad 2016 na budově U15 - Laboratorní centrum Fakulty technologické v laboratoři č. 306. Laboratoř 306 je vybavena na potřebné výrobní technologie.

Jako výztuž byla použita uhlíková tkanina s keprovou vazbou 600g/m^2 a skelná tkanina s plátňovou vazbou 200g/m^2 . Jelikož má skelná tkanina menší hmotnost, je nutné docílit zvýraznění chyb výroby, jako je například uzavření vzduchu ve vrstvách, špatné spojení vrstev apod. Proto je experimentálně navržena deska z 8-mi vrstev skelné tkanina. Pro uhlíkovou tkaninu o větší hmotnosti je navržena deska ze 4 vrstev. Jako matrice je použita epoxidová pryskyřice L285 (MGS).

7.1 Příprava formy

Příprava formy je pro všechny technologie shodná. Proto je zde uvedena pouze jednou. Jako forma byla použita kalená skleněná deska tloušťky 6 mm (Float 6mm ESG) o rozměru š.: 1 200 mm x v.: 900 mm. Na očištěnou desku se nanese PVA separátor Polivaks EKO a rozetře se houbičkou nebo štětcem po povrchu a nechá se zaschnout. Stejný postup se opakoval 3x. Vlastnosti separátoru viz příložený technický list: Příloha 1.

7.2 Použité materiály

Polivaks EKO PVA separátor - příloha 1.

L285 (MGS) epoxidová pryskyřice - příloha 2.

Tužidlo L285 - příloha 2.

Uhlíková tkanina KORDCARBON CC600 600g/m^2 - příloha 3.

Skelná Tkanina Aeroglass 200g/m^2 - příloha 4.

7.3 Ruční kladení za mokra

Po přípravě formy, viz kapitola 7.1, se pokračuje stříháním tkaniny na požadovaný rozměr, v tomto případě š.: 600 mm x v.: 450 mm v počtu 8 ks pro skelnou tkaninu a 4 ks pro uhlíkovou tkaninu. Udávaný rozměr je přibližný a reálně se lišil o cca 10 - 30 mm z důvodu problematiky stříhání tkaniny.

Poté se veškerá tkanina pro výrobu dané desky zváží, aby bylo možné určit potřebné množství pryskyřice, které je obvykle 1,3 násobek hmotnosti tkaniny. Pro 600 g uhlíkové tkaniny je tedy potřeba 780 g epoxidové pryskyřice s tužidlem. Dle technického listu je hmotností poměr pryskyřice s tužidlem 100:40. Je tedy potřeba si do jedné nádoby připravit 557 g pryskyřice L285, a do druhé nádoby 223 g tužidla. Při manipulaci je nutné používat vinylové rukavice.

Jakmile je připravena pryskyřice, váleček a míchací tyčinka, můžeme začít s prací. Nejprve na naseparovanou formu nanese první vrstvu pryskyřice a rozetřeme ji na plochu o kousek větší než je rozměr samotné tkaniny. Následně položíme první vrstvu tkaniny. Položenou vrstvu prosycené tkaniny vyhladíme, a co nejvíce vytlačíme vzduchové bubliny pomocí válečku. Následně aplikujeme další vrstvu pryskyřice, kterou opět rovnoměrně rozprostřeme a předchozí kroky opakujeme, dokud nepoložíme poslední vrstvu. Po prosycení poslední vrstvy se snažíme za pomoci válečku vytlačit vzduchové bubliny a přebytečnou pryskyřici. Při práci je nutné myslet na dobu želatínace, kdy po uplynutí této doby začne pryskyřice želatínovat a není již možné s ní pracovat. Doba, podmínky želatínace i vytvrzení se u různých epoxidových pryskyřic liší, tudíž je vždy nutné znát její parametry viz technický list. Specifikace použité pryskyřice viz příloha 2..

Druhý den po vytvrzení se již pouze za pomoci vhodných nástrojů jako je např. špachtle, kleště apod. odformuje hotová deska.



Obr. 40. Deska z 8 vrstev skelné tkaniny [18]

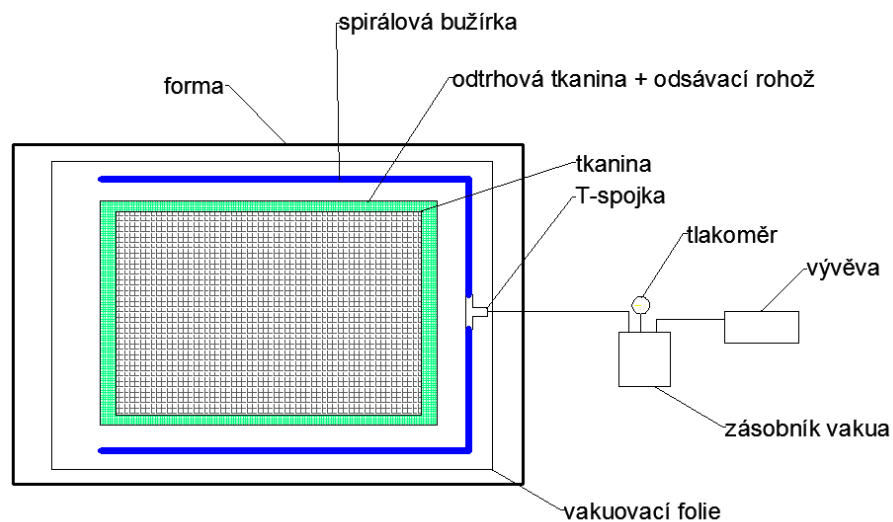
7.4 Ruční kladení s dolisováním

Formu připravíme dle kapitoly 7.2., avšak s obměnou. Separátor neaplikujeme ve vzdálenosti cca 10 cm od hrany formy, aby nenastal problém s nalepením vakuového systému.

Poté je nutné připravit si pomocné materiály na vakuové dolisování. Připravíme si T spojku, na kterou osadíme ze dvou protilehlých stran spirálovou bužírku, a na třetí vývod pak bude napojena vakuová vývěva.

Následně je nutné ověřit průchodnost a těsnost systému vývěvy (tj. tlakových hadic a zásobníku vakua). Uspořádání zapojení bude následující: T spojka → tlaková hadice → zásobník vakua → tlaková hadice → vývěva.

Po zapojení systému zkontrolujeme jeho funkci tak, že volné konce T-spojky nasávají vzduchu při zapnutí vývěvy. Následně tlakovou hadicí před vstupem do zásobníku vakua přehneme a stlačíme pomocí zaškrcovacích kleští. Na tlakoměru sledujeme růst podtlaku, který indikuje těsnost systému. Tím je provedena zkouška průchodnosti a těsnosti zapojení.



Obr. 41. Schéma ručního kladení s dolisováním [18]

Dále je nutné připravit si odtrhovou tkaninu. Tato tkanina musí být o 2 - 3 cm větší v délce i šířce než je rozměr tkaniny v kompozitu. Obdobně připravíme i odsávací rohož, která při dolisování odsaje přebytečnou pryskyřici. Jako poslední si připravíme vakuovací folii, s rozměrem, který překračuje velikost odtrhové tkaniny o 15 - 20 cm, než je velikost odtrhové tkaniny. Důvodem zvětšení je tvorba bariéry mezi formou a folií mezi kompozitní

deskou a spirálovou bužírkou, která bude odvádět vzduch a přesah za spirálovou bužírkou o cca 5 cm. Po obvodu folie si přilepíme těsnící butylovou pásku, jelikož v průběhu procesu již nebude dostatek času.

Následujícím krokem příprav materiálu na výrobu kompozitní desky je nastříhání tkaniny a příprava folie. Tkaninu si připravíme o rozměru š.: 600 mm x v.: 450 mm v požadovaném počtu vrstev.

Následně provedeme vážení tkaniny a připravíme si do dvou misek pryskyřici a zvláště tužidlo s obdobným výpočtem množství viz kapitola 7.3. Obě složky pečlivě smícháme, viz kapitola 7.3.

Dále provedeme kladení vrstev. Snažíme se vše provést co nejrychleji, neboť následné operace jsou časově velmi náročné a mohlo by dojít k vytvrzování pryskyřice před dolisováním.

Po dokončení kladení vrstev osadíme T spojku se spirálovou bužírkou, kterou dáme po obvodu vyráběné desky ve vzdálenosti cca 5 cm a zapojíme ji do okruhu s vývěvou. T spojku připevníme a dotěsníme ze spodní strany pomocí butylové pásky k formě.

Na kompozitní desku rozprostřeme odtrhovou tkaninu, odsávací rohož a jako poslední položíme vakuovací folii. Vakuovací folii nejdříve přilepíme v rozích cca 5 cm od spirálové bužírky, a následně uprostřed délky hrany. Poté postupujeme na zbývajících místech a z přebytků vytvoříme tzv. „sloní uši“, které nám folii zvrásní, a vytvoří tak ochranné zóny proti přetržení napínající se folie. K nadměrnému napínání by tak nemělo dojít. Výše uvedené těsnící kroky je nutné provést velmi pečlivě, aby nedošlo ke ztrátě podtlaku.

V předposledním kroku výroby zapneme vývěvy a sledujeme nárůst podtlaku na tlakoměru. V případě ztráty nebo kolísání tlaku je nutné vzduchový průduch najít a zatěsnit. Správnou funkci systému lze následně pozorovat jako prosycování odsávací rohože pomocí přebytečné pryskyřice. Při udržení konstantního podtlaku vyčkáme do doby, než dojde k vytvrzování pryskyřice. Poté můžeme vývěvu vypnout. Doba vytvrzování viz. technický list 2.

Posledním krokem je odformování, které je taktéž časově náročné, neboť musíme provést odstranění všech pomocných materiálů. Odtrhová tkaninu s odsávací rohoží vytvoří na kompletu pevný celek, který je velmi obtížné odtrhnout. Proto je vhodné použít kleště

a špachtli. Po odstranění pomocných materiálů oddělíme vyrobenou kompozitní desku od formy.

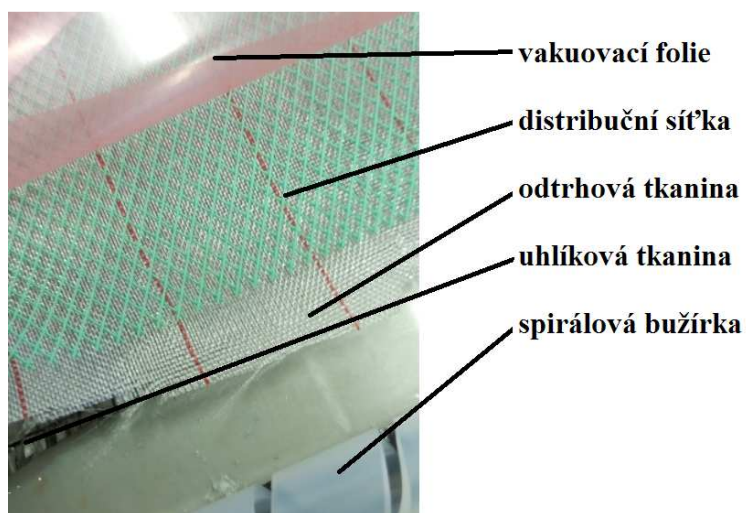
7.5 Vakuová infuze

Nejprve je nutné, připravit formu a pomocné materiály. Formu připravíme obdobně, jak bylo popsáno v kapitole 7.2., ale opět s úpravou, kdy necháme ve vzdálenosti cca 10 cm prostor od hrany formy bez separátoru, jinak by nedošlo k dostatečnému přilnutí těsnící butylové pásky k formě.

Následně si připravíme odtrhovou tkaninu a distribuční síťku s přesahem 2 - 3 cm, oproti délkám vyztužující tkaniny ve vyráběném kompozitu. Jako poslední z pomocných materiálů si připravíme vakuovací folii a systém vakuové infuze, včetně T spojky se spirálovou bužírkou, obdobně jako bylo popsáno v kapitole 7.4. Navíc si připravíme druhou T spojku s hadicí, která bude sloužit jako nasávání pryskyřice.

Poté si nastříháme tkaninu, kterou zvážíme a připravíme si pryskyřici v hmotnostním poměru vůči tkanině 1:1,5. Tužidlo s pryskyřici však ještě nesmíme smíchat dohromady. Tím máme připravené všechny potřebné materiály. Následně je nutné vše připravit na formu.

Na naseparovanou formu položíme požadovaný počet vrstev neprosycené tkaniny a překryjeme je odtrhovou tkaninou, následně pak distribuční síťkou.



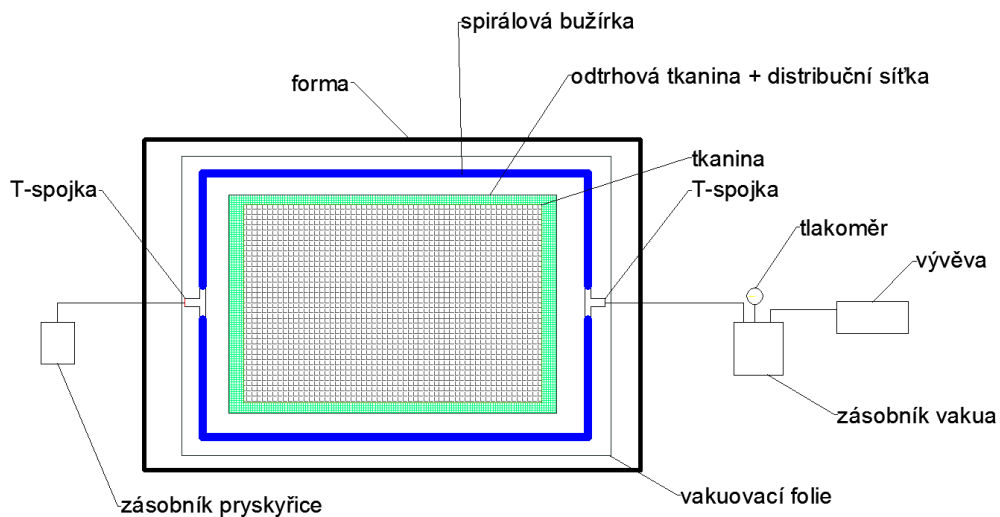
Obr. 42. Skládání vrstev na formu [18]

Na jedné kratší straně umístíme doprostřed délky hrany ve vzdálenosti cca 5 cm od tkaniny ústí s T spojkou a po obvodě tkaniny ji propojíme pomocí spirálové bužírky s druhou T spojkou, která je napojena na vývěvu ve vzdálenosti cca 5 cm od vyztužující tkaniny.

Poté celý systém překryjeme a zatěsníme vakuovací folií.

Následně zaškrtneme hadičku, která bude sloužit pro infuzi pryskyřice, a zapneme vývěvu pro kontrolu těsnosti systému. Pokud systém drží stabilní podtlak, můžeme vývěvu vypnout a vtokovou hadičku uvolnit.

Jako poslední krok v nádobě smícháme připravenou pryskyřici s tužidlem. Do nádoby vložíme vtokovou hadičku a zapneme vývěvu. Podtlak začne nasávat do tkaniny pryskyřici a distribuční síťka urychlí její rozvod. Jakmile pozorujeme, že v hadičce vedoucí do zásobníku vakua mizí vzduchové bubliny, zaškrtneme vtok i hadici vedoucí do zásobníku vakua a vypneme vývěvu.



Obr. 43. Schéma zapojení vakuové infuze [18]

Posledním krokem výroby je odformování, které se provede druhý den po vytvrzení pryskyřice. Opět je nutné odstranit pomocné materiály, kdy s povrchem kompozitní desky zůstane pevně spojená odtrhová tkanina s distribuční sítka. Odstranění provedeme pomocí kleští a špachtle. Odstranění je však jednodušší než v případě ručního kladení s dolisováním. Po odstranění odtrhové tkaniny oddělíme kompozitní desku od formy.



Obr. 44. Kompozitní desky s uhlíkovou výztuží pro výrobu vzorků [18]

7.6 Řezání desek na zkušební tělesa

Rozměr zkušebních těles byl navržen v následujících rozměrech. Pro tahovou zkoušku budou vyřezaná zkušební tělesa dle normy ČSN EN ISO 527-4 o rozměru 200 mm x 20 mm, na tlakovou zkoušku 50 mm x 10 mm. Na ohybovou zkoušku o rozměru 100 mm x 20 mm. Z důvodu eliminace tepelného ovlivnění pryskyřice a vytržení vláken při řezáním kotoučem, bylo rozhodnuto že nařezání provede firma Forlit & Metal a.s. pomocí vodního paprsku. Řezání bylo provedeno na stroji Flow Waterjet Mach 3 4020b s 3D hlavicí.



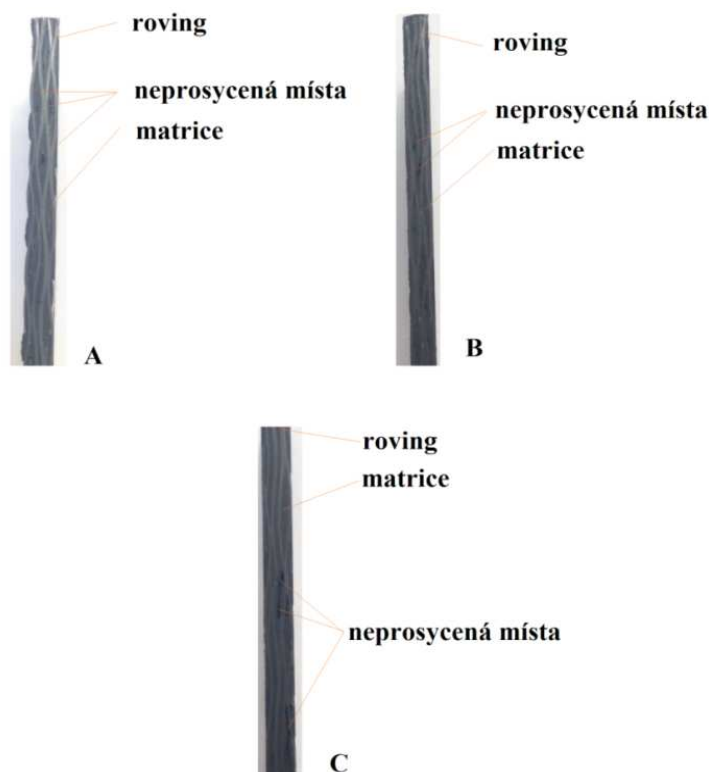
Obr. 45. Nařezané zkušební vzorky (z leva): uhlíková tkanina, skelná tkanina [18]

Na obrázku č. 43. jsou nafoceny vzorky vyráběné pomocí ručního kladení za mokra. Bohužel jak je částečně zřetelné na fotografiích vzorků ze skelné tkaniny, došlo při jejich řezání na okrajích k částečné delaminaci vrstvy. Tento jev se vždy projevil v rozích řezání, ale po upnutí do čelistí zkušebního stroje neměl žádný vliv na měření, bylo tedy možné je použít. Nicméně v praxi při výrobě komponent na jakýkoliv výrobek, je nutné přesný zdroj delaminace najít a eliminovat jej úpravou řezných podmínek apod.

Největší výskyt delaminace se projevil u ručního kladení skelné tkaniny. Delaminace je pravděpodobně způsobena tím, že ve vzorcích se v místě řezu koncentrovaly vzduchové bubliny. Při řezání vodním paprskem došlo při tlakovém zatížení proudem vody uvnitř dutinky k tlaku mezi laminami, a došlo tedy k uvolnění vrstvy.

Na níže uvedených obrázcích jsou vybrané vzorky nafoceny z blízka pro vyobrazení kvality struktury. V případě ručního kladení lze pozorovat nerovnou svrchní stranu vzorku. U dalších dvou technologií je strana proti povrchu formy rovná, jelikož rovnoměrný tlak a separační folie zaručí kvalitní rovný povrch pro další zpracování. V případě vzorků vyro-

bených pomocí ručního kladení je zřetelné, že jsou vzduchové bubliny uzavřeny v objemu vzorku, ale i na povrchu, kde byla forma. Vzorky vyrobené pomocí ručního kladení s dolisováním mají vzduchové bubliny uprostřed tělesa, pravděpodobně uzamčené uvnitř hmoty při dolisování. U vakuové infuze se neprosycená místa objevila na straně formy. Je to způsobeno prouděním pryskyřice od distribuční tkaniny směrem k formě, kdy v některých místech nedošlo k dostatečnému zatečení.



Obr. 46. Pohled na strukturu vzorků: a) ruční kladení, b) ruční kladení s dolisováním, c) vakuová infuze [18]

V závislosti na výrobní technologii se měnila i celková tloušťka vzorků, proto jsou v níže uvedené tabulce uvedené průměrné naměřené hodnoty tloušťky. Za povšimnutí stojí tloušťka vzorků vyrobených pomocí ručního kladení s dolisováním, která je vždy menší než u zbývajících dvou technologií.

Tabulka 4. Naměřené průměrné hodnoty tlouštěk vzorků t [18]

Technologie	Uhlíkové vlákno	Skelné vlákno
Ruční kladení za mokra	±3,2	±1,85
Ruční kladení s dolisováním	±2,5	±1,51
Vakuová infuze	±3,12	±1,75

8 STATICKÉ ZKOUŠKY

V praktické části jsou provedeny tři druhy zkoušek těles pro porovnání kvality použitých výrobních technologií. První zkouška je tahová, druhá ohybová a třetí tlaková.

Testy byly provedeny na univerzálním stroji Zwick 1456 a veškerá obsluha měřícího přístroje, včetně nastavení zkušebních parametrů zpracování výsledků, probíhalo v softwaru TestExpert II.

8.1 Zkušební stroj

Zwick 1456

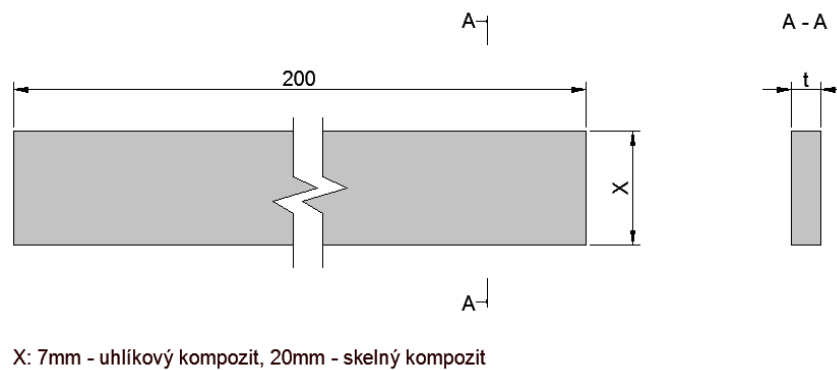
Maximální posuv příčnicku	800 mm/min
Snímače síly	do 20kN
Tepelná komora	-80°C až +250°C
TestExpert II software	Tah / Tlak / Ohyb



Obr. 47. Zkušební stroj Zwick 1456 [18]

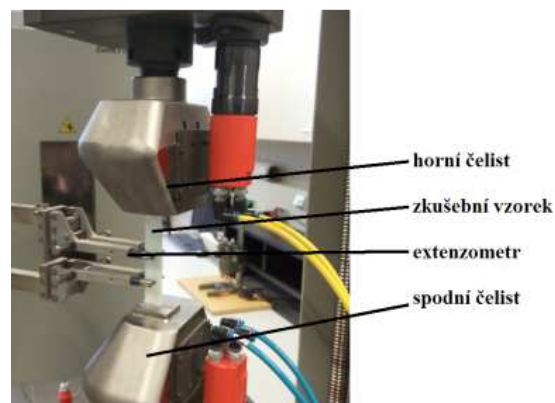
8.2 Zkouška tahem

Tahová zkouška byla provedena na zkušebním stroji Zwick 1456 za pomoci softwaru TestExpert II. Zkušební tělesa byla experimentálně navržena dle normy ČSN EN ISO 527-4. Při měření modulu E byl nastaven posuv 2 mm/min, a po jeho získání se změnila rychlost posuvu na 10 mm/min. Vzdálenost extenzometru byla nastavena na 30 mm. Předzátížení bylo nastaveno na 10 N a vzdálenost mezi čelistmi byla 100 mm.



Obr. 48. Zkušební těleso pro tahovou zkoušku [18]

Při měření bylo zjištěno, že zkušební tělíska vyztužená uhlíkovou tkaninou nemohou být roztržena, jelikož mají větší pevnost než je maximální možné zatížení stroje Zwick 1456. Jedno zkušební tělísko z každé série proto bylo experimentálně zkoušeno na trhacím stroji Shimadzu pro zjištění meze pevnosti v tahu vyrobených zkušebních vzorků. Po dokončení měření s naměřenou hodnotou $\sigma_{Mt}=562$ MPa bylo nutné provést úpravu zkušebních těles na šířku 7 mm místo původních 20mm. Úprava vzorků byla nutná z důvodu problematického měření na zkušebním stroji Shimadzu, kde z důvodu nepřesného optického měření prodloužení nebylo možné změřit modul pružnosti v tahu. (Jednotlivé výsledky měření viz příloha 5.)



Obr. 49. Fotografie tahové zkoušky vzorku uhlíkového kompozitu [18]

8.2.1 Výsledky jednotlivých měření zkoušky tahem

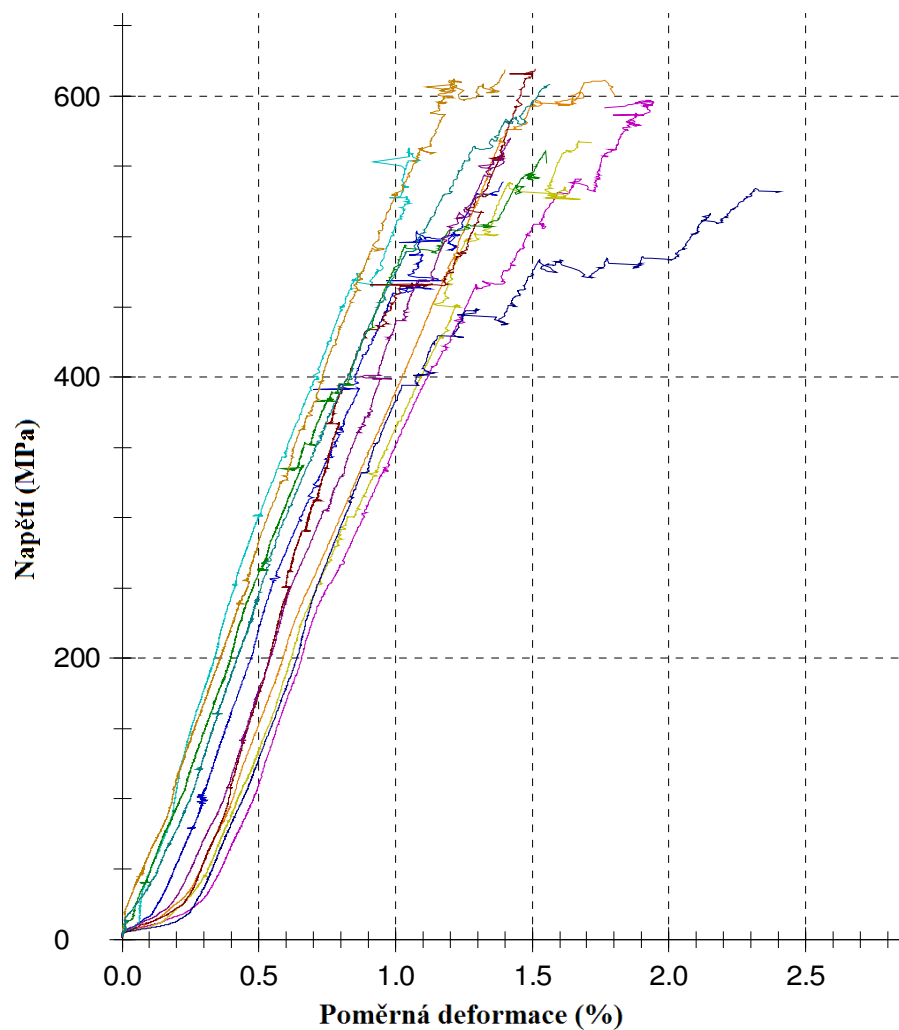
Tahová zkouška 1.:

Výrobní technologie: Vakuová infuze

Matrice: Havel L285, Výztuž: Uhlíková tkanina - 4 vrstvy

Tabulka 5. Zkouška tahem uhlíková tkanina - vakuová infuze

	E [MPa]	σ_{Mt} [MPa]	ε při σ_{Mt} [%]	W při σ_{Mt} [Nmm]
\bar{X}	56 300	581	1,6	3 322,42
s	$\pm 6 130$	$\pm 31,3$	$\pm 0,3$	$\pm 791,8$
v	10,89	5,38	20,54	23,83



Obr. 50. Tahová zkouška uhlíkový kompozit - vakuová infuze

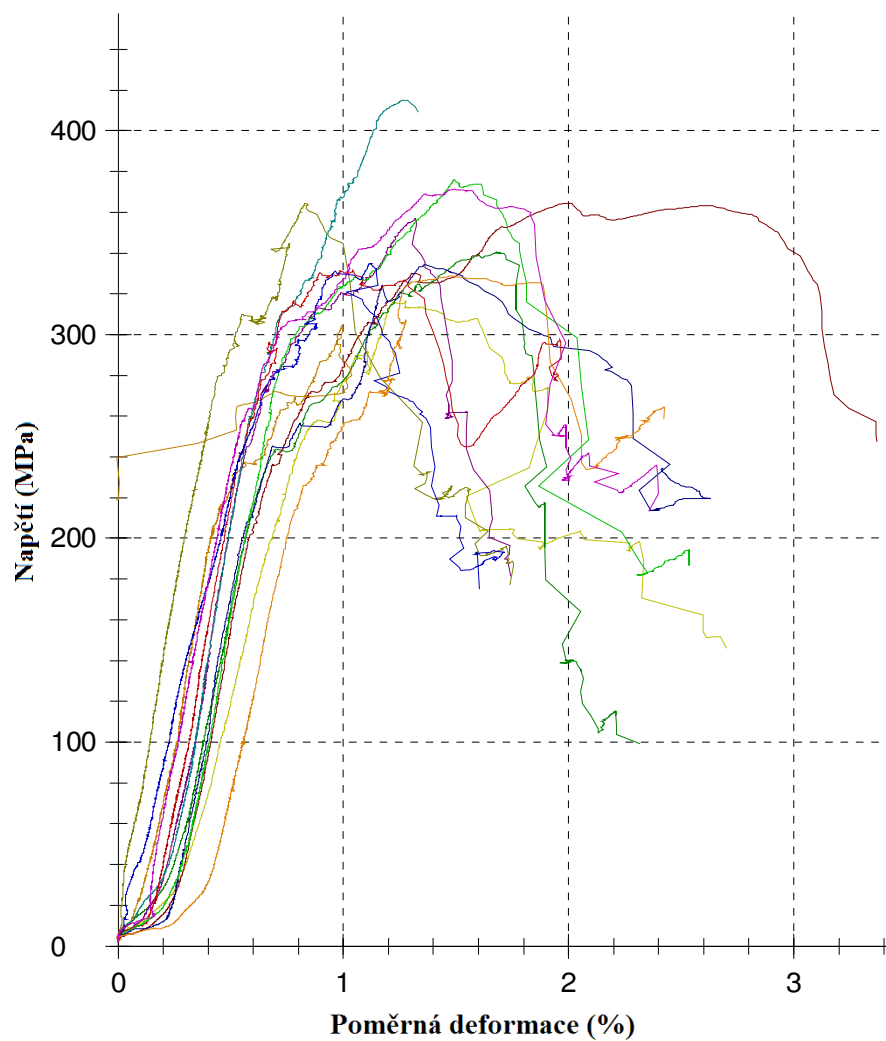
Tahová zkouška 2.:

Výrobní technologie: Ruční kladení s dolisováním

Matrice: Havel L285, Výztuž: Uhlíková tkanina - 4 vrstvy

Tabulka 6. Zkouška tahem uhlíková tkanina - ruční kladení s dolisováním

	E [MPa]	σ_{Mt} [MPa]	ε při σ_{Mt} [%]	W při σ_{Mt} [Nmm]
\bar{X}	55 800	349	1,3	1 512,03
s	±6 500	±29,4	±0,3	±469,21
v	11,66	8,42	23,2	31,03



Obr. 51. Tahová zkouška uhlíkový kompozit - ruční kladení s dolisováním

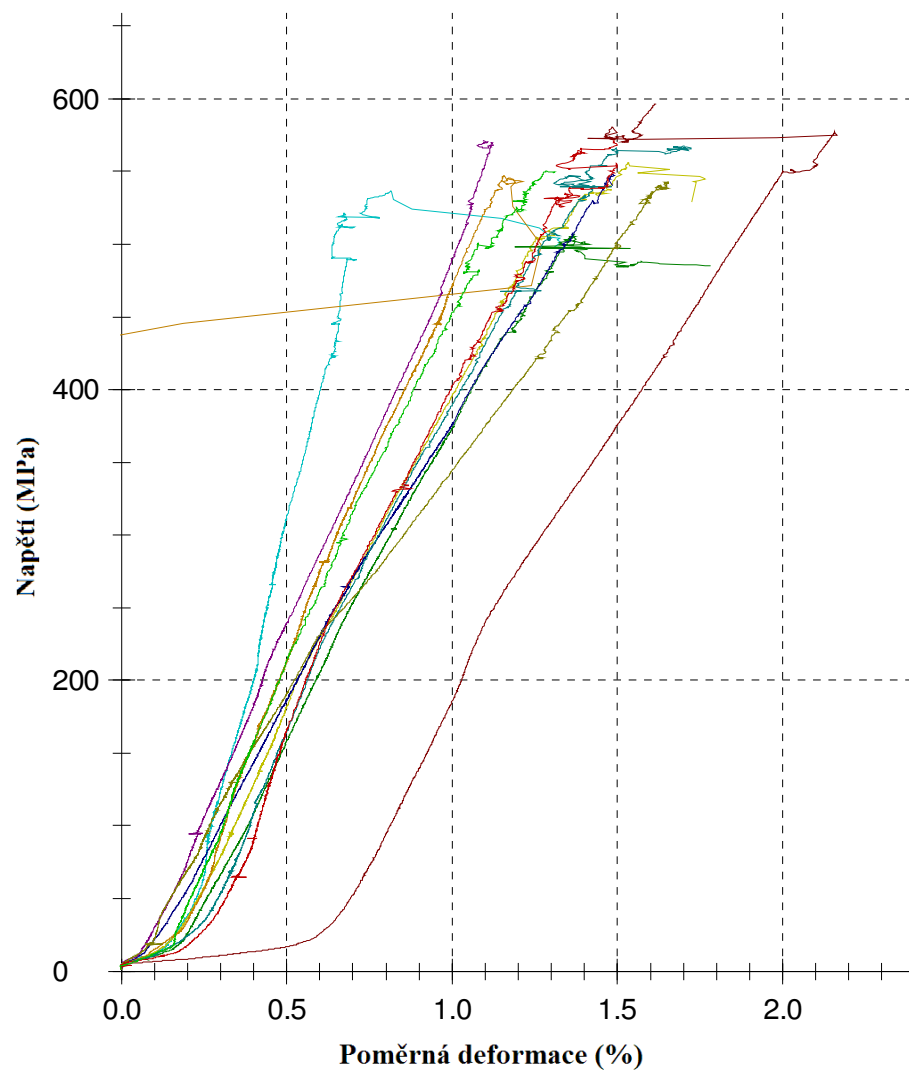
Tahová zkouška 3.:

Výrobní technologie: Ruční kladení za mokra

Matrice: Havel L285, Výztuž: Uhlíková tkanina - 4 vrstvy

Tabulka 7. Zkouška tahem uhlíková tkanina - ruční kladení za mokra

	E [MPa]	σ_{Mt} [MPa]	ε při σ_{Mt} [%]	W při σ_{Mt} [Nmm]
\bar{X}	53 000	554	1,4	2 322,98
s	$\pm 14 200$	$\pm 23,1$	$\pm 0,3$	$\pm 705,87$
v	26,71	4,16	19,69	30,39



Obr. 52. Tahová zkouška uhlíkový kompozit - ruční kladení za mokra

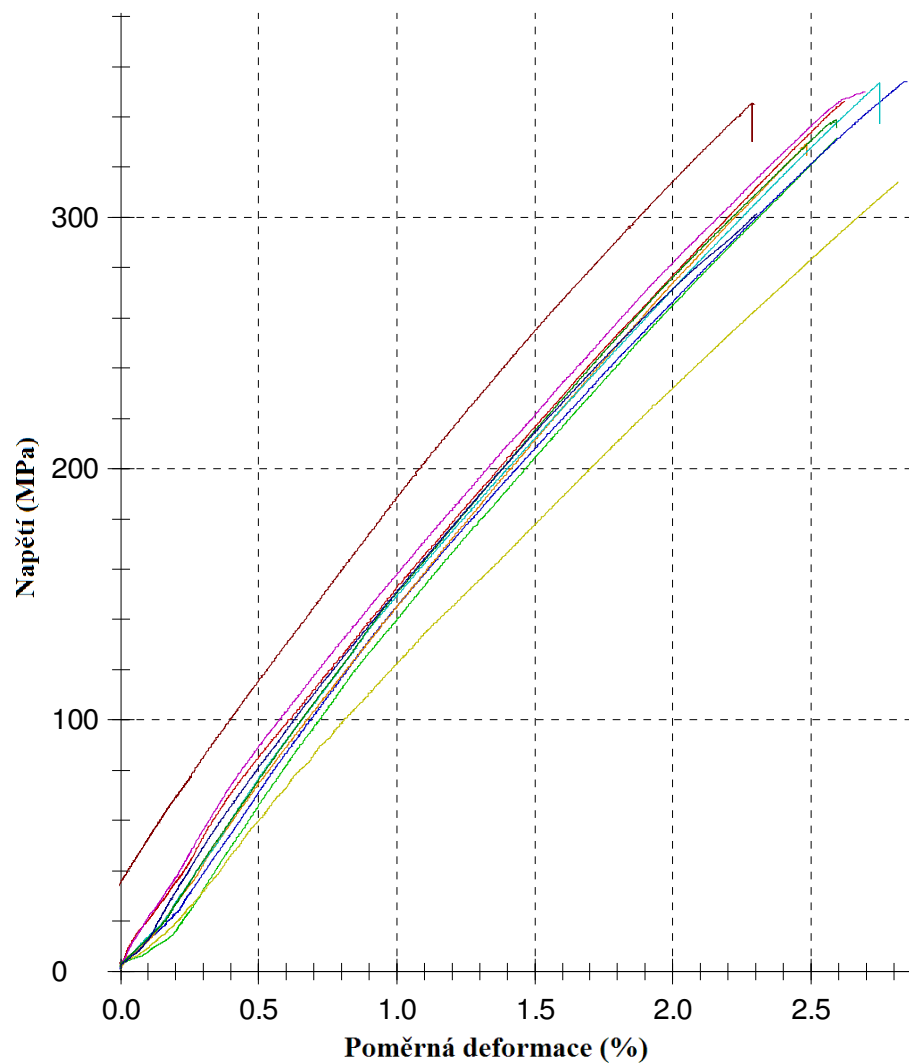
Tahová zkouška 4.:

Výrobní technologie: Vakuová infuze

Matrice: Havel L285, Výztuž: Skelná tkanina - 8 vrstev

Tabulka 8. Zkouška tahem skelná tkanina - vakuová infuze

	E [MPa]	σ_{Mt} [MPa]	ε při σ_{Mt} [%]	W při σ_{Mt} [Nmm]
\bar{X}	14 300	336	2,6	4 737,33
s	$\pm 1\ 620$	$\pm 17,5$	$\pm 0,2$	$\pm 500,33$
v	11,35	5,21	7,49	10,56



Obr. 53. Tahová zkouška skelná tkanina - vakuová infuze

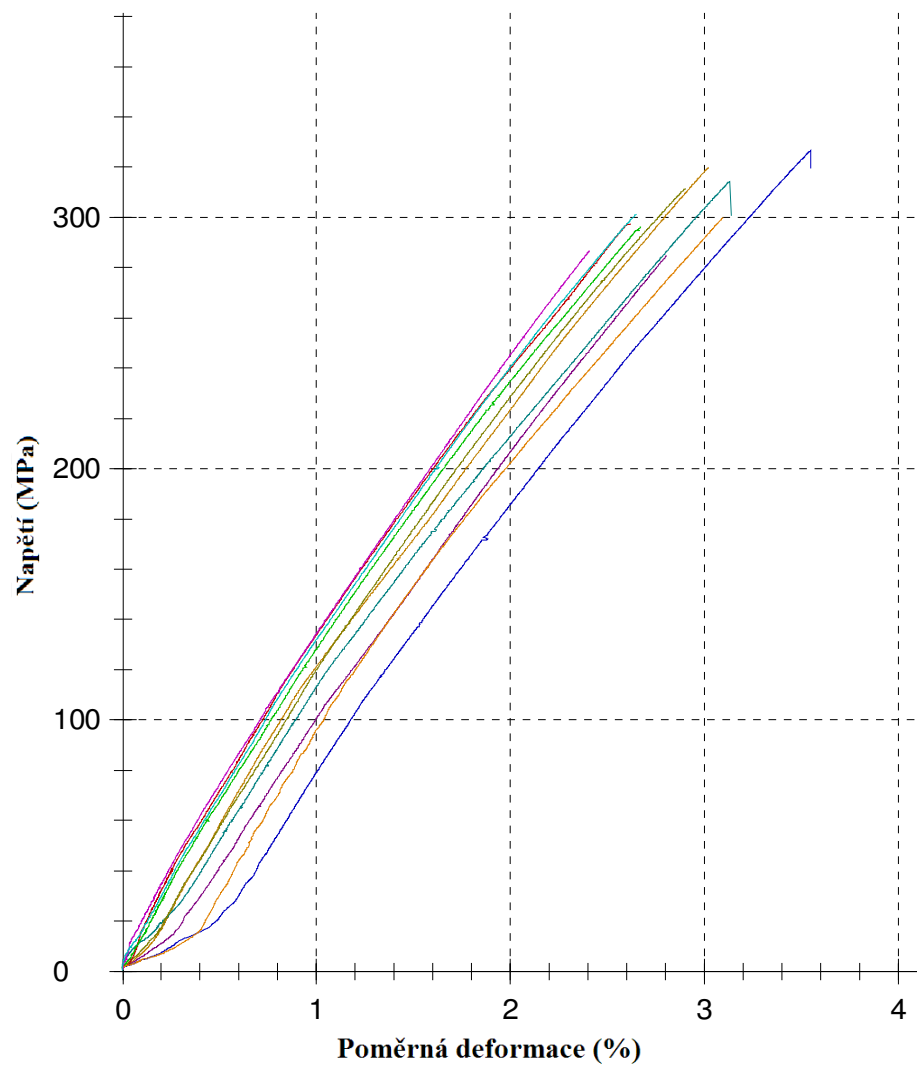
Tahová zkouška 5.:

Výrobní technologie: Ruční kladení s dolisováním

Matrice: Havel L285, Výztuž: Skelná tkanina - 8 vrstev

Tabulka 9. Zkouška tahem skelná tkanina - ruční kladení s dolisováním

	E [MPa]	σ_{Mt} [MPa]	ε při σ_{Mt} [%]	W při σ_{Mt} [Nmm]
\bar{X}	13 000	293	2,6	4 066,39
s	$\pm 1 940$	$\pm 19,8$	$\pm 0,3$	$\pm 626,63$
v	14,92	6,74	12,19	15,41



Obr. 54. Tahová zkouška skelná tkanina - ruční kladení s dolisováním

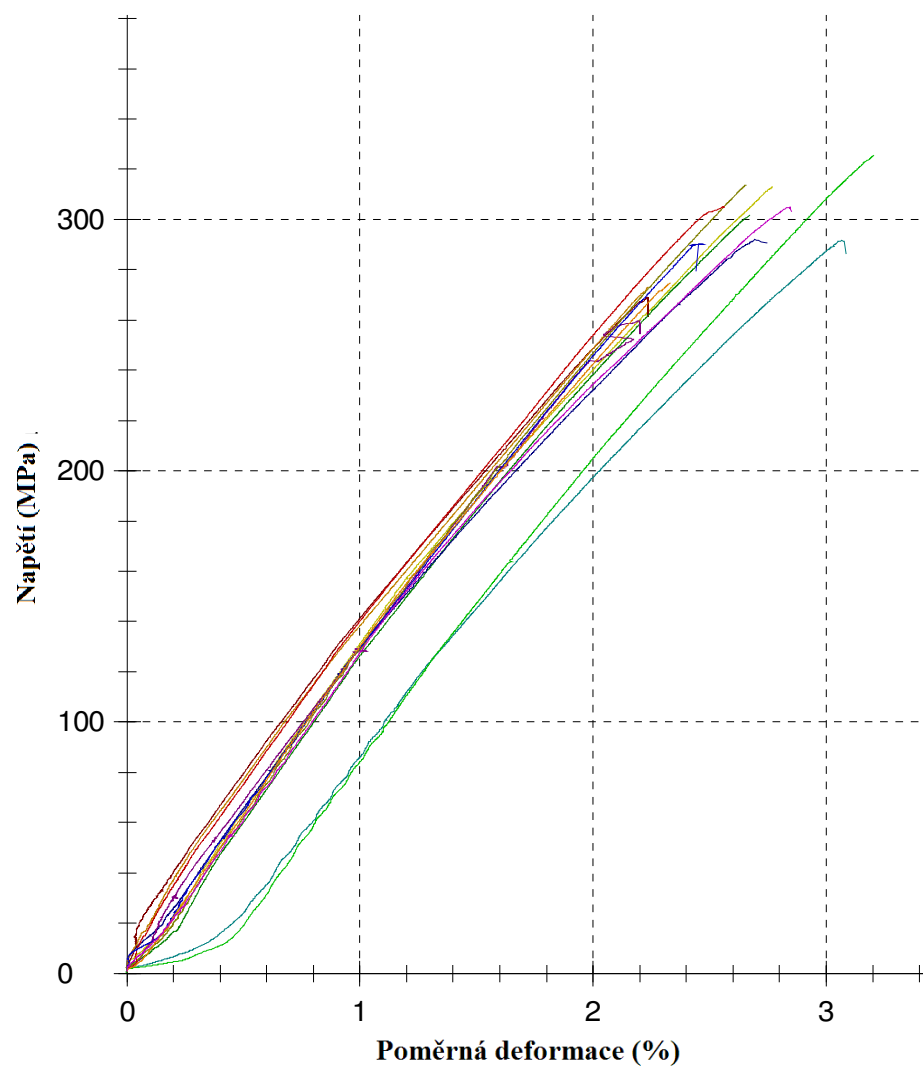
Tahová zkouška 6.:

Výrobní technologie: Ruční kladení za mokra

Matrice: Havel L285, Výztuž: Skelná tkanina - 8 vrstev

Tabulka 10. Zkouška tahem skelná tkanina - ruční kladení za mokra

	E [MPa]	σ_{Mt} [MPa]	ε při σ_{Mt} [%]	W při σ_{Mt} [Nmm]
\bar{X}	12 800	304	2,9	5 398,58
s	±943	±13,8	±0,3	±698,02
v	7,36	4,54	11,38	12,93



Obr. 55. Tahová zkouška skelná tkanina - ruční kladení za mokra

8.2.2 Diskuze a vyhodnocení tahové zkoušky

Shrnutí naměřených hodnot pro uhlíkový kompozit je uvedeno v tabulce 11. Naměřené hodnoty modulu pružnosti v tahu jsou přibližně obdobné u všech výrobních technologií. Nejnižší průměrně naměřené hodnoty modulu pružnosti v tahu dosahují vzorky vyrobené pomocí ručního kladení $E=53\,000$ MPa. Při podrobnějším zkoumání naměřených hodnot lze však vyzorovat, že technologie ručního kladení s dolisováním a vakuová infuze dosahují velmi podobných hodnot, ale oproti ručnímu kladení s polovičním rozptylem, tudíž lze tyto dvě technologie považovat za lepší, s rovnoměrnějším prosycením pryskyřicí.

Z pohledu meze pevnosti v tahu jsou naměřené hodnoty velmi obdobné u technologie ručního kladení s dolisováním a vakuové infuze. Nicméně při pohledu na maximální práci W při σ_{Mt} zřetelně dominuje vakuová infuze. Vzorky vyrobené pomocí této technologie lze tedy považovat za nejkvalitnější s největší odolností proti zatížení. Velmi překvapující jsou výsledky měření vzorků vyrobených metodou ručního kladení s dolisováním, kde jsou naměřené hodnoty meze pevnosti v tahu rapidně nižší než u ostatních technologií, i když mají s ostatními vzorky z uhlíkové tkaniny totožnou skladbu.

Tabulka 11. Porovnání výsledných hodnot tahových zkoušek kompozitů z uhlíkové tkaniny

Uhlíková tkanina				
	E [MPa]	σ_{Mt} [MPa]	ε při σ_{Mt} [%]	W při σ_{Mt} [Nmm]
Vakuová infuze				
\bar{X}	56 300	581	1,6	3 322,42
s	±6 130	±31,3	±0,3	±791,8
v	10,89	5,38	20,54	23,83
Ruční kladení s dolisováním				
\bar{X}	55 800	349	1,3	1 512,03
s	±6 500	±29,4	±0,3	±469,21
v	11,66	8,42	23,2	31,03
Ruční kladení				
\bar{X}	53 000	554	1,4	2 322,98
s	±14 200	±23,1	±0,3	±705,87
v	26,71	4,16	19,69	30,39

V tabulce č. 12. jsou shrnuty výsledky měření vzorků vyztužených skelnou tkaninou. Opět lze v malé míře pozorovat rozdílné hodnoty modulu pružnosti v tahu, kdy nejlepší průměr-

né hodnoty $E=14\,300$ MPa dosahuje technologie vakuové infuze, následuje ruční kladení s dolisováním $E=13\,000$ MPa, a nejnižší z naměřených hodnot dosahují vzorky vyrobené pomocí ručního kladení za mokra $E=12\,800$ MPa. U ručního kladení za mokra lze pozorovat nejmenší rozptyl naměřených hodnot, který závisí na kvalitě prosycení materiálu a množství pryskyřice v kompozitu. V případě ručního kladení za mokra je kvalita velmi závislá na preciznosti pracovníka.

Průměrné hodnoty meze pevnosti v tahu σ_{Mt} se u měřených vzorků pohybují od 293 MPa do 336 MPa v závislosti na technologii zpracování. Nejlepších výsledků dosahují vzorky vyráběné pomocí vakuové infuze, kde je průměrná hodnota $\sigma_{Mt}=336$ MPa. Velmi podobných hodnot meze pevnosti v tahu dosahuje následně technologie ručního kladení za mokra $\sigma_{Mt}=304$ MPa. Nejhůře, avšak pouze s malým rozdílem dopadly vzorky v případě ručního kladení s dolisováním $\sigma_{Mt}=293$ MPa. Důležitým faktorem je i směrodatná odchylka naměřených hodnot meze pevnosti v tahu, která je nejmenší v případě ručního kladení za mokra $s = \pm 13,8$ MPa.

Tabulka 12. Porovnání výsledných hodnot tahových zkoušek kompozitů ze skelné tkaniny

Skelná tkanina				
	E [MPa]	σ_{Mt} [MPa]	ε při σ_{Mt} [%]	W při σ_{Mt} [Nmm]
Vakuová infuze				
\bar{X}	14 300	336	2,6	4 737,33
s	$\pm 1\,620$	$\pm 17,5$	$\pm 0,2$	$\pm 500,33$
v	11,35	5,21	7,49	10,56
Ruční kladení s dolisováním				
\bar{X}	13 000	293	2,6	4 066,39
s	$\pm 1\,940$	$\pm 19,8$	$\pm 0,3$	$\pm 626,63$
v	14,92	6,74	12,19	15,41
Ruční kladení				
\bar{X}	12 800	304	2,9	5 398,58
s	± 943	$\pm 13,8$	$\pm 0,3$	$\pm 698,02$
v	7,36	4,54	11,38	12,93

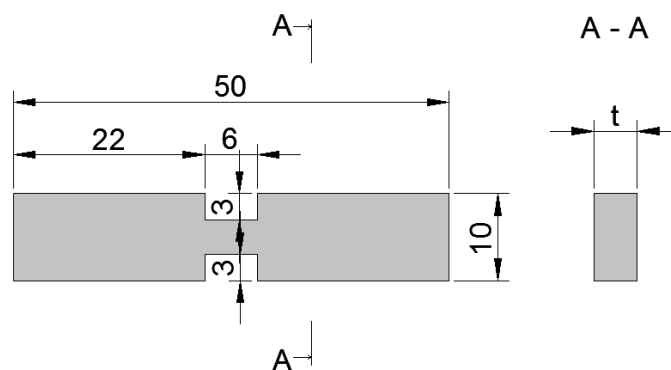
8.3 Zkouška tlakem

Experimentální zkouška tlakem byla taktéž prováděna na zkušebním stroji Zwick 1456, s tím rozdílem, že místo uchycovacích čelistí byly osazeny podpěry pro zkoušku trojbodovým ohybem. Zkouška byla prováděna dle normy ČSN EN ISO 604. Tvar zkušební tělesa byl volen dle několikrát zkoušeného tvaru viz Obr. 57. Případnému vybočení zkušební tělesa je bráněno pomocí speciálního přípravku kviz Obr. 56. Jelikož se při řezání vodním paprskem objevily náznaky delaminace, jak již bylo uvedeno. Rozhodl jsem, že do těles pro zkoušku tlakem budou drážky frézovány, aby se předešlo případným problémům v rozích drážek při řezání vodní tryskou.

Rozdílné počty měření jsou způsobeny množstvím připravených zkušebních vzorků, a také v závislosti na průběhu zkoušky. Lom musel být vždy ve zúžení pod úhlem 45° (smyk), jinak by měření nebylo platné. Norma nařizuje minimálně měření minimálně na 6-ti vzorcích. (Jednotlivé výsledky měření viz příloha 6.)



Obr. 56. Přípravek proti vybočení zkušební tělesa [18]



Obr. 57. Zkušební těleso pro zkoušku tlakem [18]

8.3.1 Výsledky jednotlivých měření zkoušky tlakem

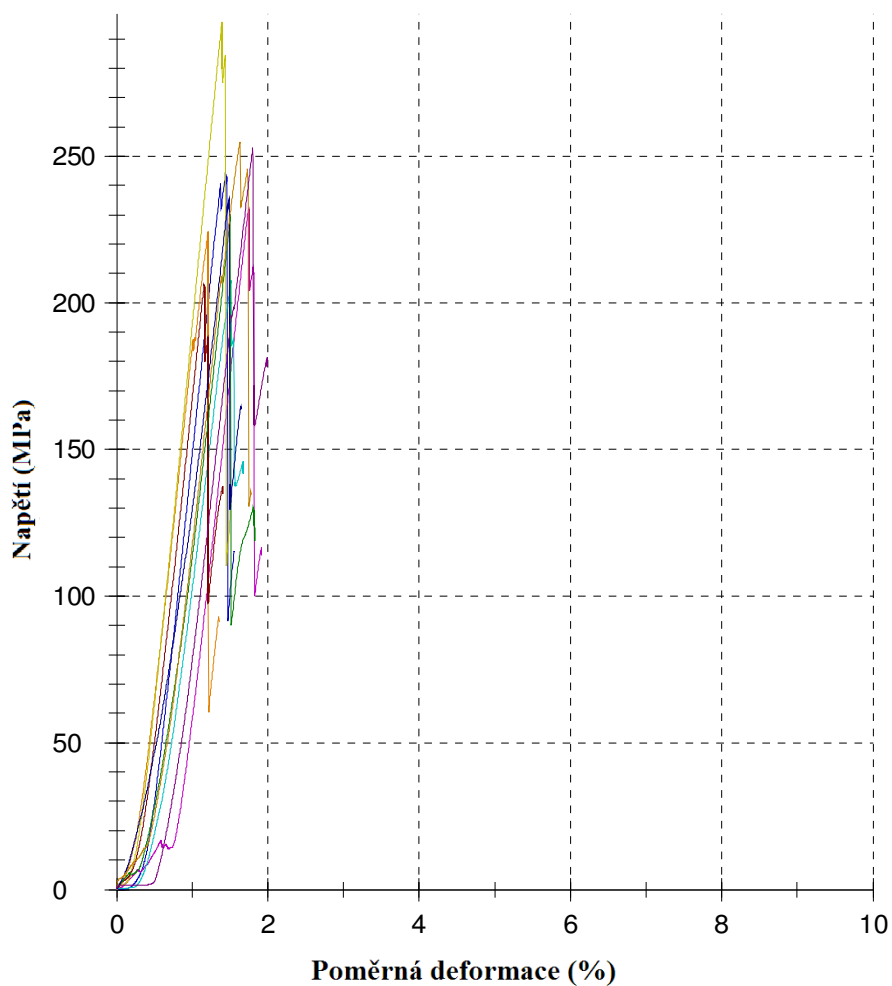
Tlaková zkouška 1.:

Výrobní technologie: Vakuová infuze

Matrice: Havel L285, Výztuž: Uhlíková tkanina - 4 vrstvy

Tabulka 13. Zkouška tlakem uhlíková tkanina - vakuová infuze

	E [MPa]	σ_{Md} [MPa]	ε při σ_{Md} [%]	W při σ_{Md} [Nmm]
\bar{X}	21 300	238	1,5	838,06
s	$\pm 2\,950$	± 26	$\pm 0,2$	$\pm 151,23$
v	13,82	10,93	13,86	18,05



Obr. 58. Tlaková zkouška uhlíkový kompozit - vakuová infuze

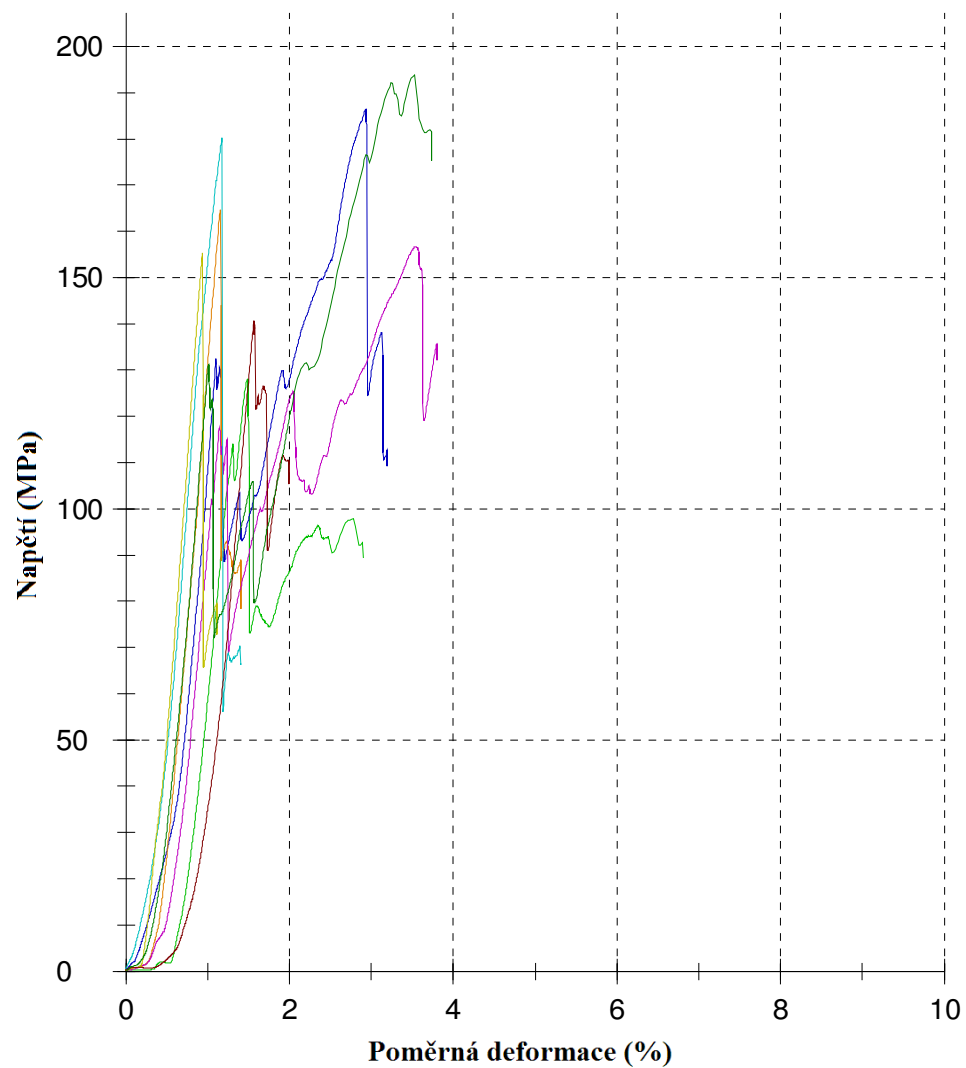
Tlaková zkouška 2.:

Výrobní technologie: Ruční kladení s dolisováním

Matrice: Havel L285, Výztuž: Uhlíková tkanina - 4 vrstvy

Tabulka 14. Zkouška tlakem uhlíková tkanina - ruční kladení s dolisováním

	E [MPa]	σ_{Md} [MPa]	ϵ při σ_{Md} [%]	W při σ_{Md} [Nmm]
\bar{X}	18 200	163	2	844,16
s	$\pm 3 220$	$\pm 22,7$	$\pm 1,1$	$\pm 727,26$
v	17,65	13,92	54,11	86,15



Obr. 59. Tlaková zkouška uhlíkový kompozit - ruční kladení s dolisováním

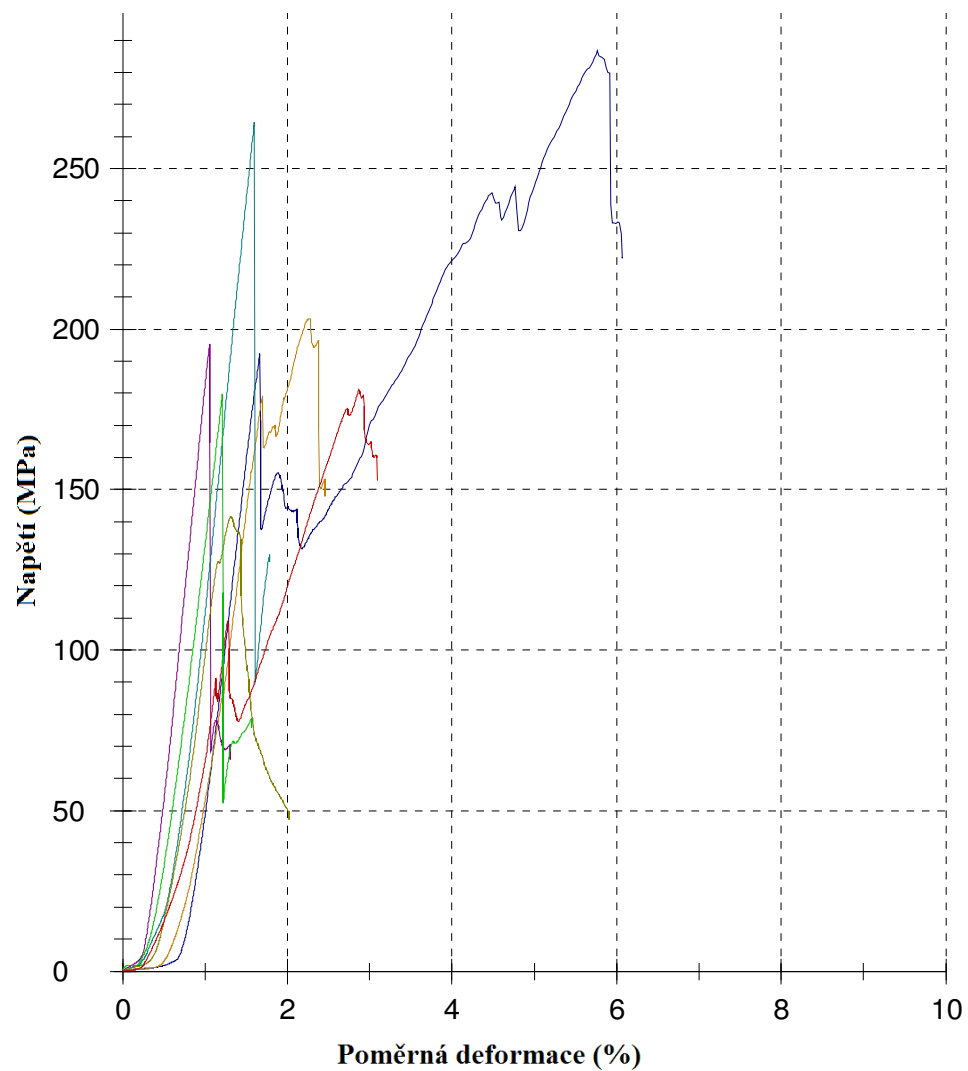
Tlaková zkouška 3.:

Výrobní technologie: Ruční kladení za mokra

Matrice: Havel L285, Výztuž: Uhlíková tkanina - 4 vrstvy

Tabulka 15. Zkouška tlakem uhlíková tkanina - ruční kladení za mokra

	E [MPa]	σ_{Md} [MPa]	ϵ při σ_{Md} [%]	W při σ_{Md} [Nmm]
\bar{X}	17 600	207	2,3	1 569,93
s	±5 370	±50,8	±1,7	±1 933,04
v	30,42	24,49	72,17	123,13



Obr. 60. Tlaková zkouška uhlíkový kompozit - ruční kladení za mokra

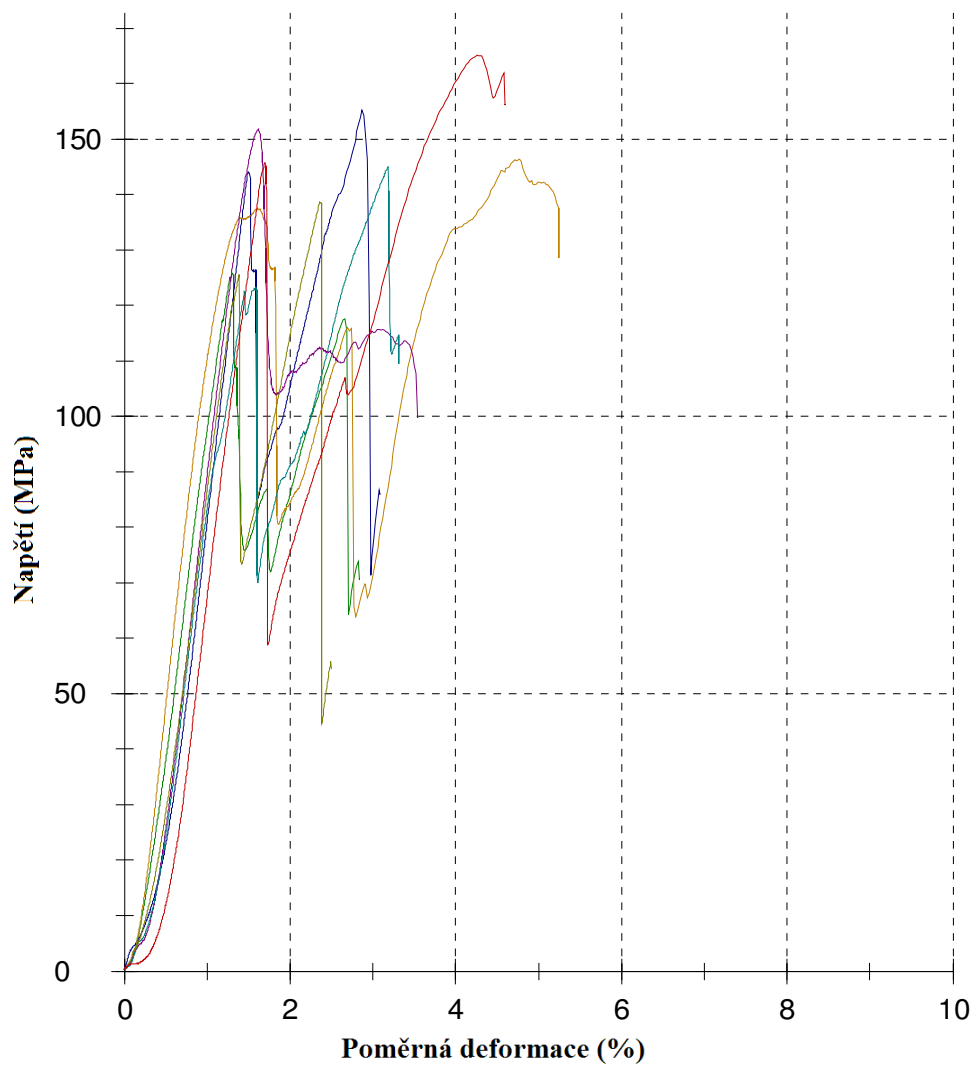
Tlaková zkouška 4.:

Výrobní technologie: Vakuová infuze

Matrice: Havel L285, Výztuž: Skelná tkanina - 8 vrstev

Tabulka 16. Zkouška tlakem skelná tkanina - vakuová infuze

	E [MPa]	σ_{Md} [MPa]	ϵ při σ_{Md} [%]	W při σ_{Md} [Nmm]
\bar{X}	12 400	147	2,9	910,24
s	±646	±12,6	±1,3	±533,98
v	5,2	8,56	44,14	58,66



Obr. 61. Tlaková zkouška skelná tkanina - vakuová infuze

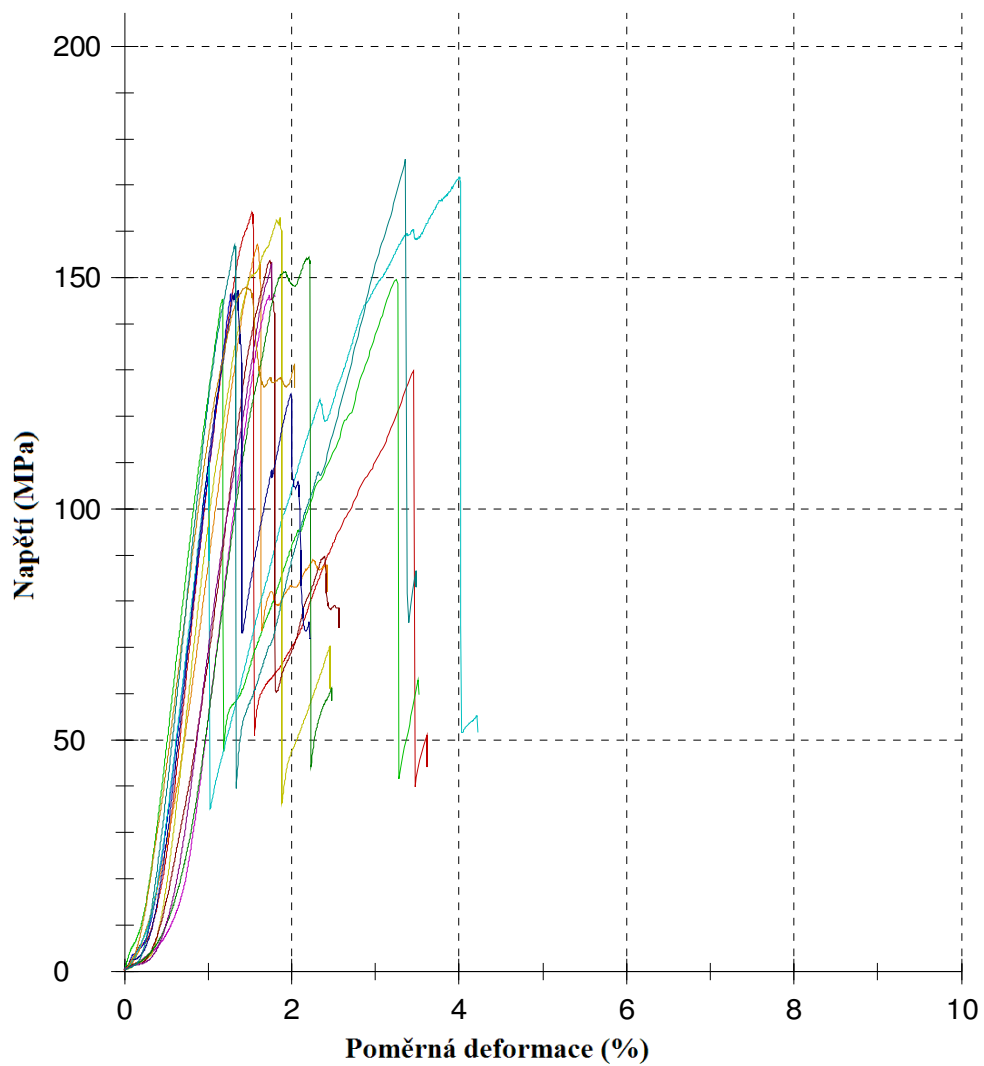
Tlaková zkouška 5.:

Výrobní technologie: Ruční kladení s dolisováním

Matrice: Havel L285, Výztuž: Skelná tkanina - 8 vrstev

Tabulka 17. Zkouška tlakem skelná tkanina - ruční kladení s dolisováním

	E [MPa]	σ_{Md} [MPa]	ε při σ_{Md} [%]	W při σ_{Md} [Nmm]
\bar{X}	14 600	156	2,1	482,41
s	±2 080	±9,73	±0,9	±306,06
v	14,24	6,23	41,88	63,44



Obr. 62. Tlaková zkouška skelná tkanina - ruční kladení s dolisováním

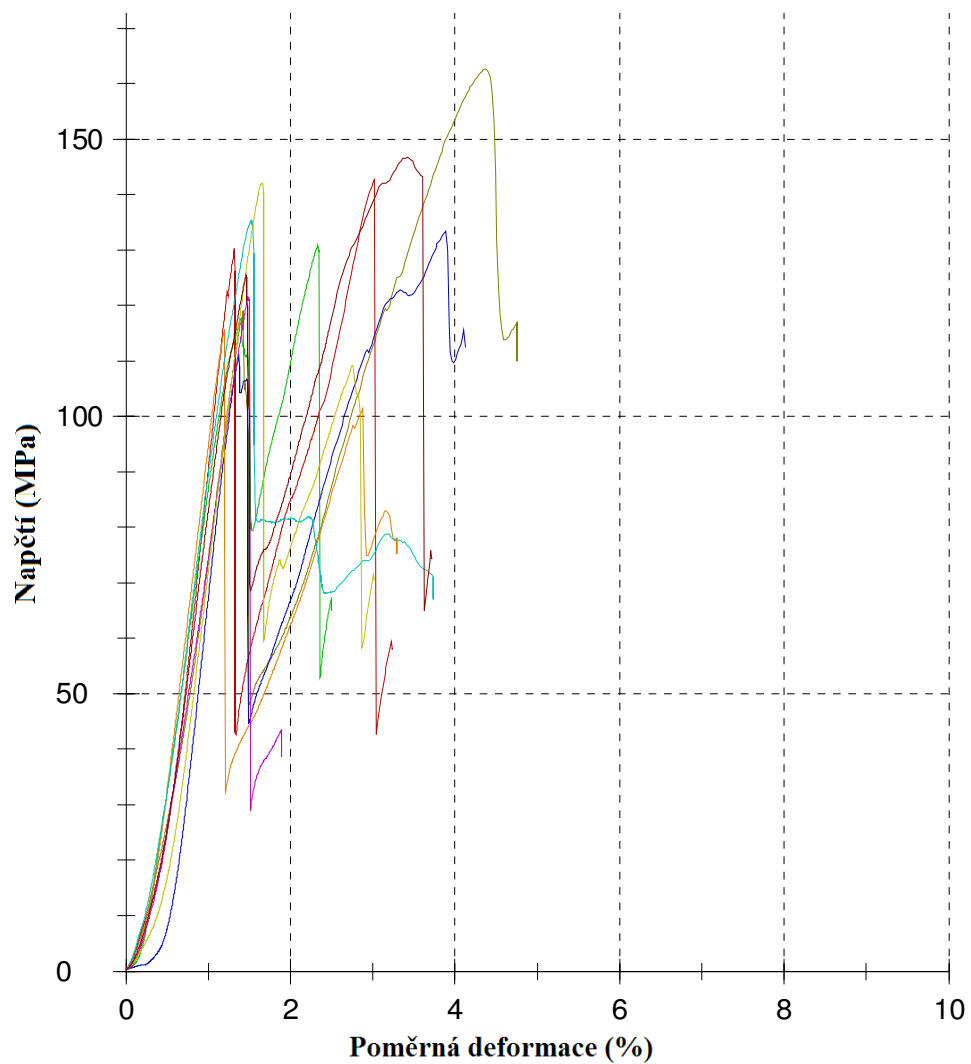
Tlaková zkouška 6.:

Výrobní technologie: Ruční kladení za mokra

Matrice: Havel L285, Výztuž: Skelná tkanina - 8 vrstev

Tabulka 18. Zkouška tlakem skelná tkanina - ruční kladení za mokra

	E [MPa]	σ_{Md} [MPa]	ε při σ_{Md} [%]	W při σ_{Md} [Nmm]
\bar{X}	12 100	137	2,5	705,9
s	±1 420	±13,9	±1,2	±435,14
v	11,73	10,17	46,01	61,64



Obr. 63. Tlaková zkouška skelná tkanina - ruční kladení za mokra

8.3.2 Diskuze a vyhodnocení zkoušky tlakem

Jak již bylo na začátku zmíněno, za platné výsledky lze považovat lom tělesa způsobený smykem, který se projeví lomem pod úhlem lomu 45° viz Obr.64. Po dokončení měření vzorku proto bylo vždy nutné prohlédnout druh lomu, a dle toho vyhodnotit platnost měření. To je také důvod, proč je v každé sérii měření rozdílný počet zkušebních vzorků, neboť ne vždy bylo možné měření brát za platné, a to jak z důvodu charakteristiky a místa lomu, tak případně u vzorků vyztužených skelnou tkaninou z důvodu deformace okraje vzorku.



Obr. 64. Lom vzorku vhodný pro vyhodnocení měření [18]

Tabulka 19. Porovnání výsledných hodnot tlakových zkoušek kompozitů z uhlíkové tkaniny

Uhlíková tkanina				
	E [MPa]	σ_{Md} [MPa]	ϵ při σ_{Md} [%]	W při σ_{Md} [Nmm]
Vakuová infuze				
\bar{X}	21 300	238	1,5	838,06
s	$\pm 2\,950$	± 26	$\pm 0,2$	$\pm 151,23$
v	13,82	10,93	13,86	18,05
Ruční kladení s dolisováním				
\bar{X}	18 200	163	2	844,16
s	$\pm 3\,220$	$\pm 22,7$	$\pm 1,1$	$\pm 727,26$
v	17,65	13,92	54,11	86,15
Ruční kladení				
\bar{X}	17 600	207	2,3	1 569,93
s	$\pm 5\,370$	$\pm 50,8$	$\pm 1,7$	$\pm 1933,04$
v	30,42	24,49	72,17	123,13

Z výsledků tlakové zkoušky vzorků vyztužených uhlíkovou tkaninou lze opět vyzorovat dominanci technologie vakuové infuze, kde výroba dosahuje nejlepších průměrných hodnot meze pevnosti v tlaku $\sigma_{Md}=238$ MPa tak i v modulu pružnosti v tlaku E 21 300 MPa.

Při pohledu na výsledky vzorků vyrobených pomocí technologii ručního kladení s dolisováním lze opět pozorovat nejmenší naměřené hodnoty meze pevnosti v tlaku $\sigma_{Md}=163$ MPa, které lze částečně přisuzovat menší tloušťce zkušební tělesa, které bylo po dolisování přibližně 2,5 mm. I tak je možné opět pozorovat lepší kvalitou prosycení a méně vad, které se projevily jako nejmenší rozptyl naměřených hodnot.

Tabulka 20. Porovnání výsledných hodnot tlakových zkoušek kompozitů ze skelné tkaniny

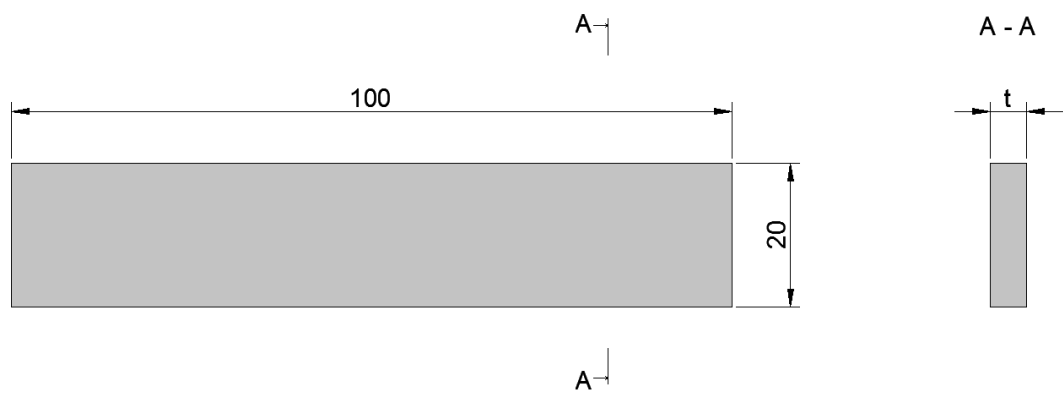
Skelná tkanina				
	E [MPa]	σ_{Md} [MPa]	ε při σ_{Md} [%]	W při σ_{Md} [Nmm]
Vakuová infuze				
\bar{X}	12 400	147	2,9	910,24
s	±646	±12,6	±1,3	±533,98
v	5,2	8,56	44,14	58,66
Ruční kladení s dolisováním				
\bar{X}	14 600	156	2,1	482,41
s	±2080	±9,73	±0,9	±306,06
v	14,24	6,23	41,88	63,44
Ruční kladení				
\bar{X}	12 100	137	2,5	705,9
s	±1420	±13,9	±1,2	±435,14
v	11,73	10,17	46,01	61,64

Na vzorcích vyztužených skelnou tkaninou při tlakové zkoušce se poprvé projevuje kvalita výroby pomocí ručního kladení s dolisováním, kde se objevuje nejvyšší průměrná mez pevnosti v tlaku $\sigma_{Md}=156$ MPa s nejmenší směrodatnou odchylkou $\pm 9,73$ MPa. Taktéž jsou zde naměřeny nejlepší hodnoty modulu pružnosti v tlaku $E=14\,600$ MPa.

Technologie vakuové infuze dosahuje dobrých hodnot meze pevnosti v ohybu $\sigma_{Md}=147$ MPa a modulu pružnosti v ohybu $E=12\,400$ MPa. Jako nejméně kvalitní technologie pro zpracování kompozitu vyztužených skelnou tkaninou vyplývá technologie ručního kladení, kde jsou naměřené nejmenší hodnoty ze všech, i s největší směrodatnou odchylkou meze pevnosti v tlaku $s=\pm 13,9$ MPa. Tyto rozdíly jsou způsobeny nestálostí dotlaku při výrobě, a také množstvím vzduchových bublin uvnitř výsledného materiálu.

8.4 Zkouška trojbodovým ohybem

Zkouška trojbodovým ohybem byla prováděna dle normy ČSN EN ISO 14125. Vzdálenost mezi podpěrami byla nastavena na 70 mm, i když norma doporučuje v případě uhlíkového vlákna 40-ti násobek tloušťky, a pro skelné vlákno 20-ti násobek tloušťky. Měření se používá pro stanovení pevnosti v ohybu, ohybového modulu a dalších parametrů. Byl použit volně podepřený hranol o rozměru v.: 100 mm x š.: 20 mm. Rychlost pro měření modulu pružnosti v ohybu byla nastavena na 1 mm/min. Po získání modulu pružnosti v ohybu se rychlost změnila na 10 mm/min. (Jednotlivé výsledky měření viz příloha 7.)



Obr. 65. Zkušební těleso pro ohybovou zkoušku [18]



Obr. 66. Fotografie ohybové zkoušky vzorku uhlíkového kompozitu [18]

8.4.1 Výsledky jednotlivých měření zkoušky ohybem

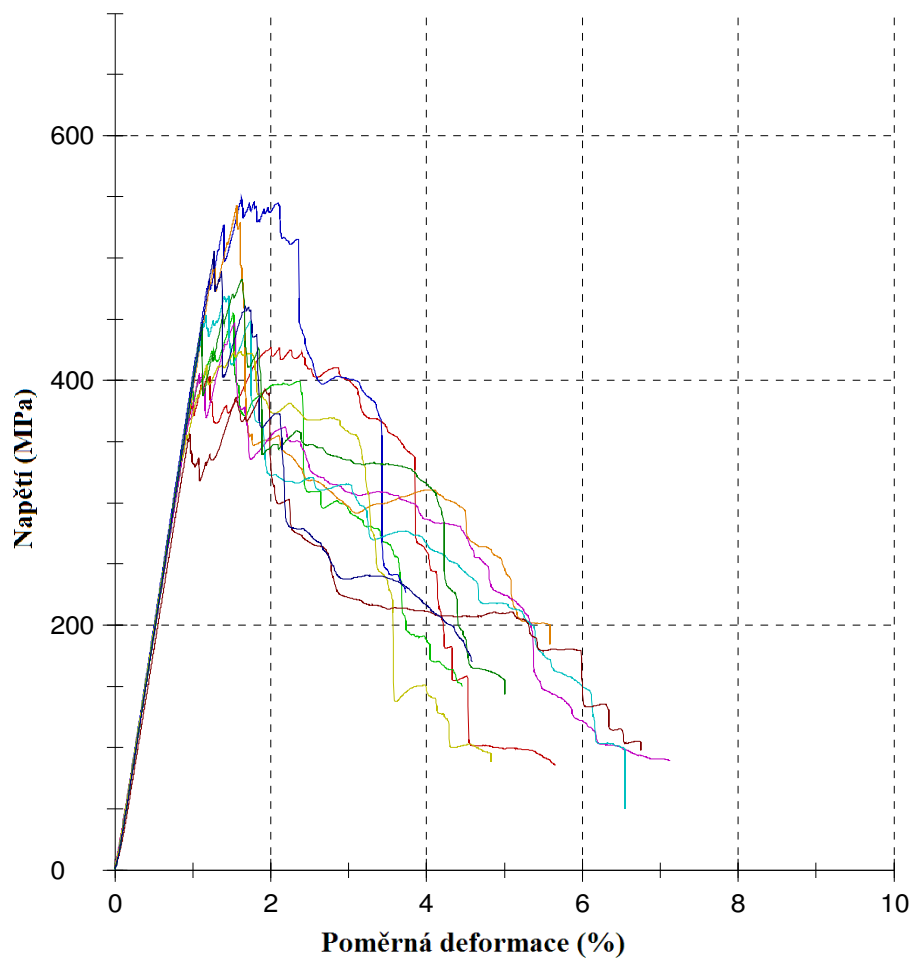
Ohybová zkouška 1.:

Výrobní technologie: Vakuová infuze

Matrice: Havel L285, Výztuž: Uhlíková tkanina - 4 vrstvy

Tabulka 21. Zkouška ohybem uhlíková tkanina - vakuová infuze

	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	ε při σ_{\max} [%]	W při σ_{\max} [Nmm]
\bar{X}	38 300	469	1,6	2 112,94
s	$\pm 1 010$	$\pm 51,4$	$\pm 0,2$	$\pm 347,38$
v	2,63	10,95	13,1	16,44



Obr. 67. Ohybová zkouška uhlíkový kompozit - vakuová infuze

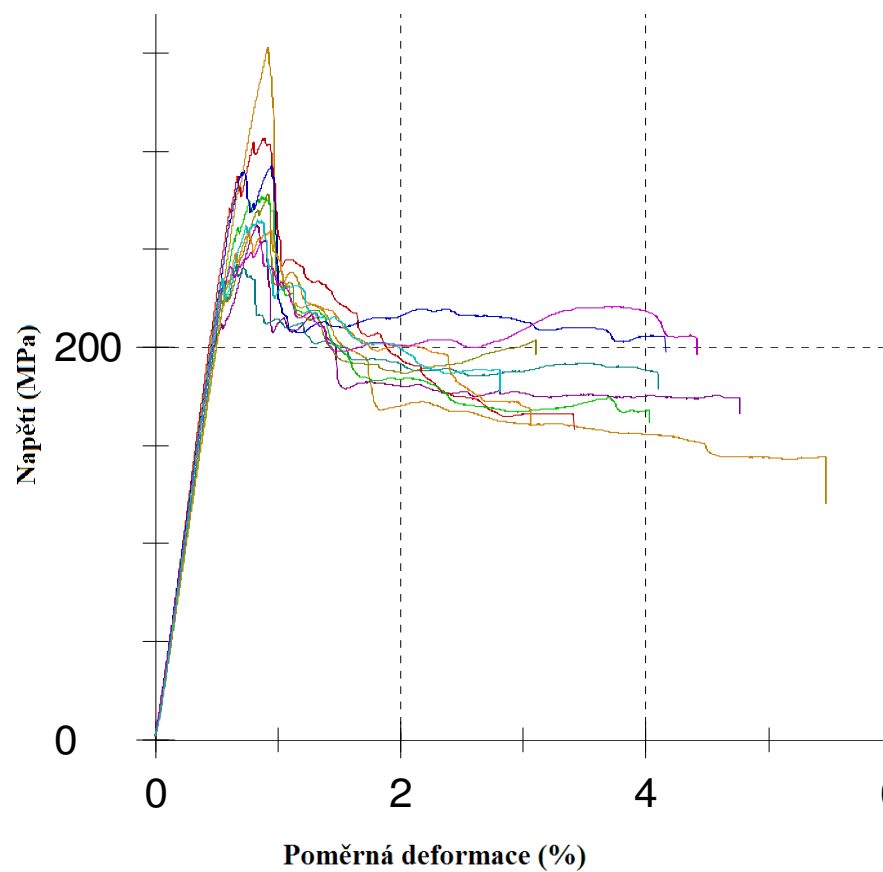
Ohybová zkouška 2.:

Výrobní technologie: Ruční kladení s dolisováním

Matrice: Havel L285, Výztuž: Uhlíková tkanina - 4 vrstvy

Tabulka 22. Zkouška ohybem uhlíková tkanina - ruční kladení s dolisováním

	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	ε při σ_{\max} [%]	W při σ_{\max} [Nmm]
\bar{X}	42 900	279	0,9	564,48
s	$\pm 2\ 200$	± 32	$\pm 0,1$	$\pm 98,6$
v	5,13	11,46	9,56	17,47



Obr. 68. Ohybová zkouška uhlíkový kompozit - ruční kladení s dolisováním

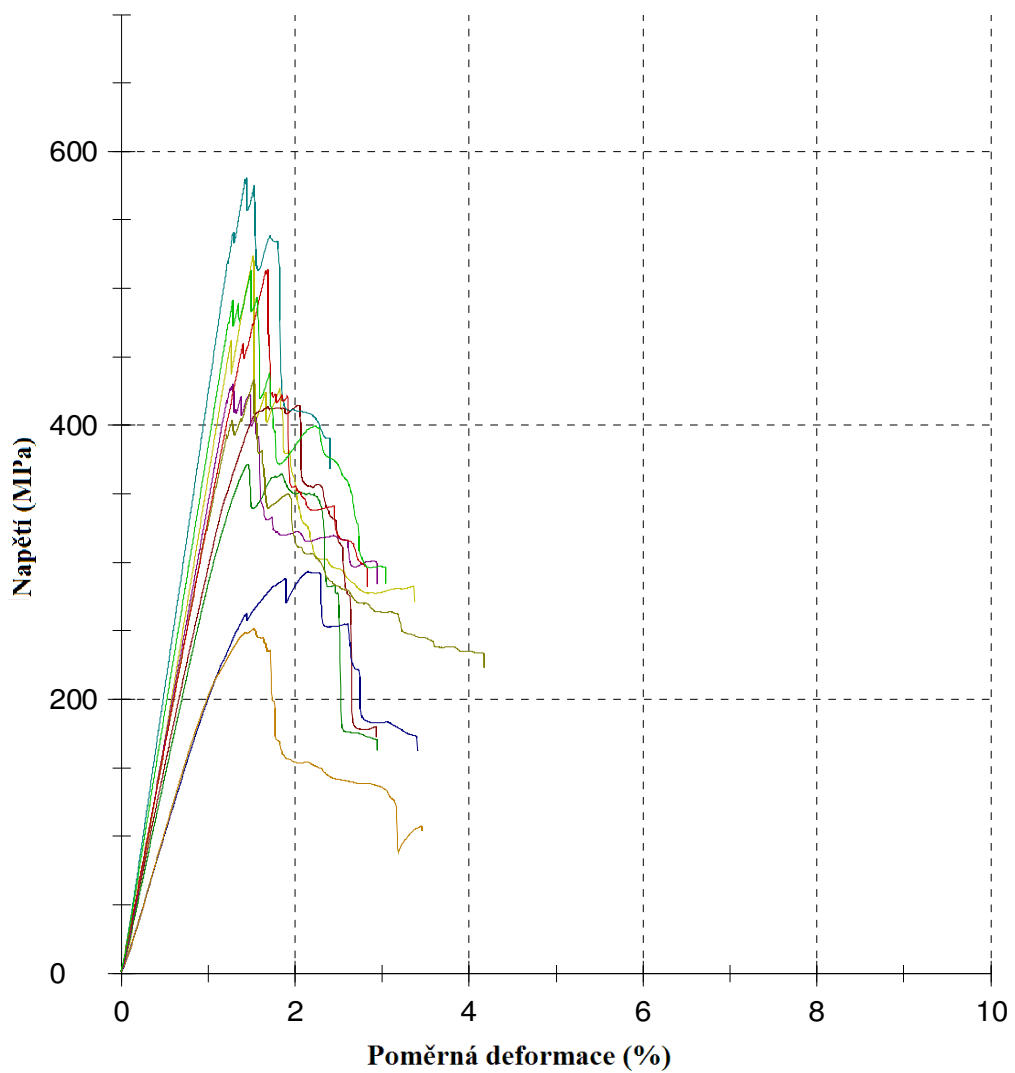
Ohybová zkouška 3.:

Výrobní technologie: Ruční kladení za mokra

Matrice: Havel L285, Výztuž: Uhlíková tkanina - 4 vrstvy

Tabulka 23. Zkouška ohybem uhlíková tkanina - ruční kladení za mokra

	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	ε při σ_{\max} [%]	W při σ_{\max} [Nmm]
\bar{X}	31 100	433	1,6	1 771,21
s	$\pm 7 000$	± 105	$\pm 0,3$	$\pm 442,37$
v	22,5	24,31	16,95	24,98



Obr. 69. Ohybová zkouška uhlíkový kompozit - ruční kladení za mokra

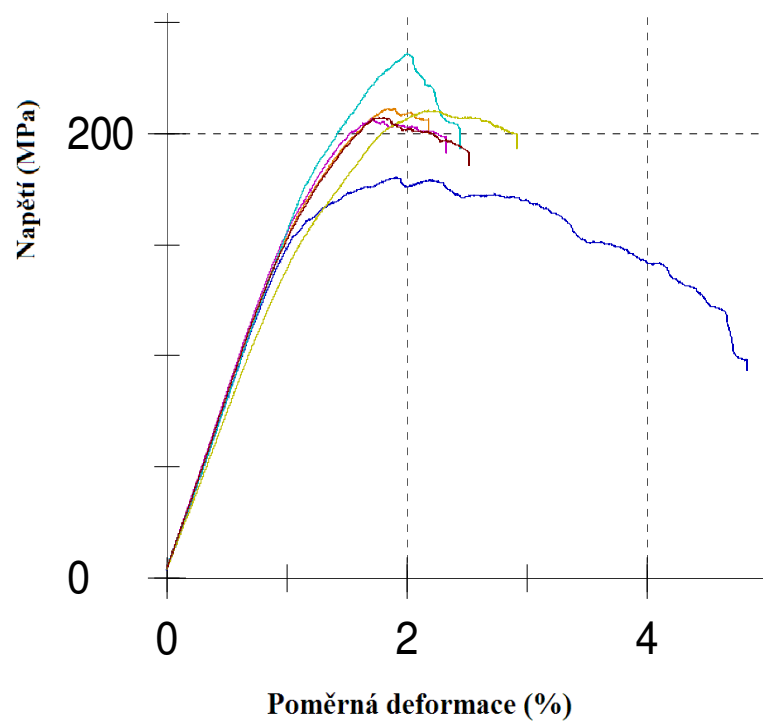
Ohybová zkouška 4.:

Výrobní technologie: Vakuová infuze

Matrice: Havel L285, Výztuž: Skelná tkanina - 8 vrstev

Tabulka 24. Zkouška ohybem skelná tkanina - vakuová infuze

	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	ε při σ_{\max} [%]	W při σ_{\max} [Nmm]
\bar{X}	15 000	209	1,9	646,59
s	± 746	$\pm 17,8$	$\pm 0,2$	$\pm 80,15$
v	4,97	8,54	8,6	12,4



Obr. 70. Ohybová zkouška skelná tkanina - vakuová infuze

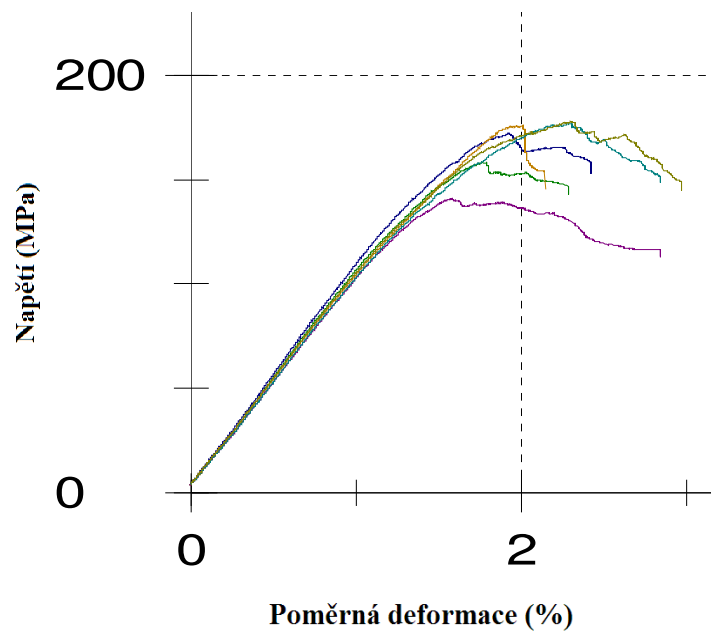
Ohybová zkouška 5.:

Výrobní technologie: Ruční kladení s dolisováním

Matrice: Havel L285, Výztuž: Skelná tkanina - 8 vrstev

Tabulka 25. Zkouška ohybem skelná tkanina - ruční kladení s dolisováním

	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	ε při σ_{\max} [%]	W při σ_{\max} [Nmm]
\bar{X}	9 710	167	2	508,77
s	±225	±14,8	±0,3	±126,71
v	2,32	8,84	14,54	24,91



Obr. 71. Ohybová zkouška skelná tkanina - ruční kladení s dolisováním

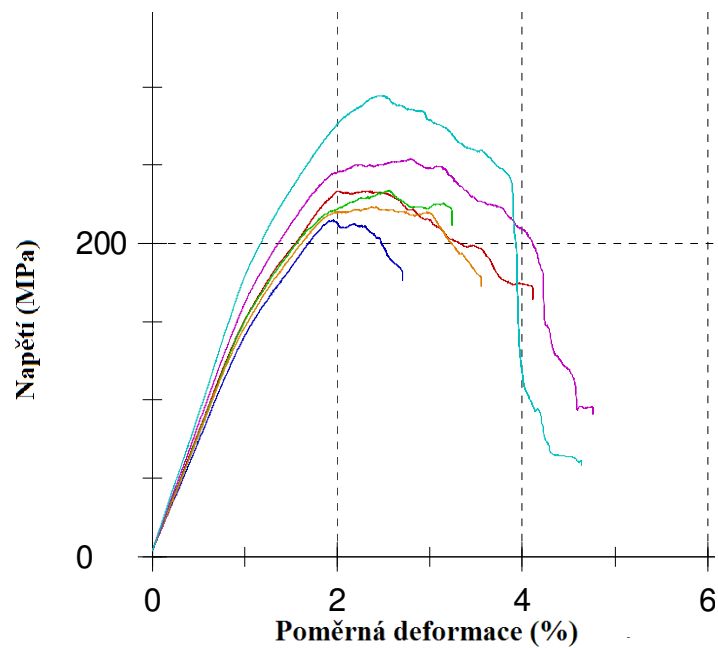
Ohybová zkouška 6.:

Výrobní technologie: Ruční kladení za mokra

Matrice: Havel L285, Výztuž: Skelná tkanina - 8 vrstev

Tabulka 26. Zkouška ohybem skelná tkanina - ruční kladení za mokra

	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	ε při σ_{\max} [%]	W při σ_{\max} [Nmm]
\bar{X}	15 400	242	2,4	1 047,59
s	$\pm 1\,410$	$\pm 28,7$	$\pm 0,3$	$\pm 241,07$
v	9,18	11,84	11,73	23,01



Obr. 72. Ohybová zkouška skelná tkanina - ruční kladení za mokra

8.4.2 Diskuze a vyhodnocení ohybové zkoušky

Tabulka 27. Porovnání výsledných hodnot ohybových zkoušek kompozitů z uhlíkové tkaniny

Uhlíková tkanina				
	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	ε při σ_{\max} [%]	W při σ_{\max} [Nmm]
Vakuová infuze				
\bar{X}	38 300	469	1,6	2 112,94
s	±1010	±51,4	±0,2	±347,38
v	2,63	10,95	13,1	16,44
Ruční kladení s dolisováním				
\bar{X}	42 900	279	0,9	564,48
s	±2200	±32	±0,1	±98,6
v	5,13	11,46	9,56	17,47
Ruční kladení				
\bar{X}	31 100	433	1,6	1 771,21
s	±7000	±105	±0,3	±442,37
v	22,5	24,31	16,95	24,98

Z výsledků měření ohybové zkoušky kompozitu vyztuženého uhlíkovou tkaninou je zřejmé, že nejvyššího modulu pružnosti v ohybu dosahují vzorky vyrobené pomocí ručního kladení s dolisováním, a to v průměru $E=42\,900$ MPa, s rozptylem modulu pružnosti v ohybu $4\,400$ MPa, ale mezí pevnosti v ohybu pouze $\sigma_{\max}=279$ MPa. U vakuové infuze, kde lze pozorovat menší hodnotu modulu pružnosti v ohybu $E = 38\,300$ MPa s menší směrodatnou odchylkou naměřených hodnot, ale s více než dvojnásobnou průměrnou mezí pevnosti v ohybu $\sigma_{\max}=469$ MPa. Tudíž technologie vakuové infuze vykazuje lepší reprodukovatelnost kvality s lepší pevností.

Z pohledu meze pevnosti v ohybu dosahuje maximálních hodnot s druhým nejmenším rozptylem technologie vakuové infuze $\sigma_{\max}=469$ MPa. Je to způsobené tím, že při infuzi si uhlíková tkanina nasaje jen potřebné množství pryskyřice, a přebytek je odsátý do zásobníku vakua. Současně dochází i k razantnímu omezení vzniku vzduchových bublin, případně k jejich odvedení do zásobníku vakua. Ale i tak, malé procento vzduchových bublin zůstane v materiálu, a způsobuje pokles pevnosti a lokální místa vzniku napětí. Ruční kladení dosahuje druhé nejvyšší pevnosti, avšak s velkým rozptylem naměřených hodnot.

Velký rozptyl naměřených hodnot je způsoben proměnným stlačením při kladení a kvalitou prosycení vrstev. V případě ručního kladení s dolisováním je viditelný velký pokles ohybové tuhosti, který je pravděpodobně způsoben malým množstvím pryskyřice v kompozitu, avšak ne špatnou prosyceností. Celková tloušťka vzorků je o 0,6 mm menší, i když je výrobek složen ze stejného počtu vrstev. Prosycení je provedeno shodně jako u ručního kladení, ale při dolisování dochází ke stlačení vrstev, a tím i k vytlačení části pryskyřice z výrobku. Odstraní se tak i maximum vzduchových bublin. Jelikož pryskyřice přenáší síly mezi vlákna, její množství ovlivňuje výslednou ohybovou pevnost, jelikož její působení je jen lokální a méně roznáší síly do plochy kompozitu.

Tabulka 28. Porovnání výsledných hodnot ohybových zkoušek kompozitů ze skelné tkaniny

Skelná tkanina				
	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	ε při σ_{\max} [%]	W při σ_{\max} [Nmm]
Vakuová infuze				
\bar{X}	15 000	209	1,9	646,59
s	±746	±17,8	±0,2	±80,15
v	4,97	8,54	8,6	12,4
Ruční kladení s dolisováním				
\bar{X}	9 710	167	2	508,77
s	±225	±14,8	±0,3	±126,71
v	2,32	8,84	14,54	24,91
Ruční kladení				
\bar{X}	15 400	242	2,4	1 047,59
s	±1410	±28,7	±0,3	±241,07
v	9,18	11,84	11,73	23,01

Při porovnávání výsledků ohybové zkoušky vzorků vyztužených skelnou tkaninou lze pozorovat, že nejlepšího modulu pružnosti v ohybu $E=15\,000$ MPa dosahují vzorky vyrobené pomocí vakuové infuze. Tyto vzorky mají směrodatnou odchylku $s=\pm 746$ MPa, která je poloviční oproti vzorkům vyrobených ručním kladením, u nichž dosahuje hodnoty $s=\pm 1\,410$ MPa. Naopak technologie ručního kladení s dolisováním dosahuje rapidně men-

šího modulu pružnosti v ohybu, ale s velmi malým rozptylem. Lze ji z hlediska reprodukovatelnosti brát jako nejlepší.

Z pohledu meze pevnosti v ohybu jasně dominuje ruční kladení, kde je pevnost způsobena nadměrným prosycením pryskyřicí, avšak lze pozorovat nestálost kvality, která se projevuje velkým rozptylem naměřených hodnot. Rozptyl je způsoben nestálostí přtlaku a rozdílným množstvím pryskyřice při procesu ručního kladení za mokra. V případě ručního kladení

s dolisováním lze opět pozorovat, že technologie vykazuje menší ohybovou tuhost, avšak s nejmenším rozptylem naměřených hodnot.

8.5 Cena materiálu pro výrobu

Jako při každé výrobě, je i hodnotícím kritériem při výrobě kompozitů cena. Proto je v níže uvedených odstavcích proveden orientační výpočet cen materiálů a práce, nutných pro výrobu kompozitní desky ze čtyř vrstev uhlíkové tkaniny o celkovém rozměru desky š.: 1 000 mm x v.: 500 mm a pryskyřice L285. Výpočet je záměrně proveden z aktuálních internetových cen bez DPH s tím, že v případě velkovýroby by byl materiál o několik procent levnější, v závislosti na odebíraném množství materiálu a smluvní dohodě mezi odběratelem a dodavatelem. Dále jsou pro výpočet použity mzdové náklady za hodinu práce dle průměru 3 Jihomoravských podniků - 226Kč/hod (pozn. částka včetně odvodů zaměstnance a zaměstnavatele).

Tabulka 29. Cena základního materiálu na výrobu kompozitní desky

Materiál	Množství	Cena
PVA separátor Polivaks EKO	50 ml	7,50 Kč
Epoxidová pryskyřice L285 (MGS)	1030 g	560 Kč
Tužidlo 285 MGS	411 g	244,50 Kč
Uhlíková tkanina KC 600 g/m ²	2 bm	1 101 Kč
Váleček, štětka, misky, míchací tyčinky apod.	1 sada	158 Kč
Celková cena materiálu bez DPH		2 071 Kč

* ceny materiálu na kompozit převzaty z www.havel-composites.com (22.4.2017)

V níže uvedených cenových srovnáních nejsou započteny náklady na energie, nákup strojů, vývoj, režijní náklady apod. Proto je v případě začátku výroby dílů, kde je potřeba zakoupit vakuová vývěva a zásobník vakua, počítat s velkými počátečními náklady v řádu 8 000 - 15 000 Kč za základní sérii strojů pro malovýrobu. Následující tabulky porovnávají pouze náklady na materiály a čas, které jsou potřebné k vyrobení uhlíkové kompozitní desky o rozměru 1 000 mm x 500 mm.

Ruční kladení za mokra

Tabulka 30. Cena za výrobu pomocí ručního kladení za mokra

Materiál	Množství	Cena
Základní materiál na výrobu kompozitu	1 sada	2 071 Kč
Práce	66 min	249 Kč
Náklady celkem bez DPH		2 320 Kč

Ruční kladení s dolisováním

Tabulka 31. Cena za výrobu pomocí ručního kladení s dolisováním

Materiál	Množství	Cena
Základní materiál na výrobu kompozitu	1 sada	2 071 Kč
Odrhová tkanina s červeným proužkem	0,7 m ²	34 Kč
Separáčnická folie ELA 20 modrá P1	0,6 m ²	17 Kč
Odsávací rohož	0,6 m ²	23 Kč
Vakuovací T-spojka	1 ks	23 Kč
Spirálová bužírka 9x12 mm	3 m	80 Kč
Těsnicí pásek LSM 6000	3,5 m	42 Kč
Vakuovací folie PO	1 m ²	55,50 Kč
Vakuovací hadice QAC98	3 m	92,50 Kč
Práce	132 min	498 Kč
Náklady celkem bez DPH		2 936 Kč

Vakuová infuze

Tabulka 32. Cena za výrobu pomocí vakuové infuze

Materiál	Množství	Cena
Základní materiál na výrobu kompozitu	1 sada	2 071 Kč

Odrhová tkanina s červeným proužkem	0,7 m ²	34 Kč
Distribuční síťka zelená	0,6 m ²	44 Kč
Vakuovací T-spojka	2 ks	46 Kč
Spirálová bužírka 9x12 mm	3 m	80 Kč
Těsnící pásek LSM 6000	3,5 m	42 Kč
Vakuovací folie PO 180	1 m ²	55,50 Kč
Vakuovací hadice QAC98 PE	3,5 m	108 Kč
Práce	113 min	426 Kč
Náklady celkem bez DPH		2 907 Kč

Tabulka 33. Porovnání cen a časové náročnosti

Technologie	Práce	Náklady na výrobek
Ruční kladení	66 min	2 320 Kč
Dolisování	132 min	2 936 Kč
Vakuová infuze	113 min	2 907 Kč

Při orientačním porovnání z hlediska ceny je nejméně nákladná produkce pomocí ručního kladení. Z výše uvedených měření je zřejmé, že je to nejméně kvalitativně stálá technologie. Je tedy nutné brát v potaz nepřesnost a hrubost kalkulace, jelikož v případě sériové výroby na specializovaném pracovišti náklady klesají s rostoucím počtem produkováných kusů. V případě vakuové infuze je možné provádět proces sériově, zapojit např. dvě formy za sebou, a tím zkrátit čas výroby se zachováním kvality. V případě ručního kladení s dolisováním je časově velmi náročné ruční kladení a následné utěsnění formy, které znamená velkou časovou náročnost zároveň v kombinaci s požadavkem na rychlost z důvodu želatinace pryskyřice.

Z finančního hlediska je tedy nejlepší produkce pomocí ručního kladení za mokra, ale s možností nestálé kvality výroby. Z hlediska kvality a reprodukovatelnosti je nejvhodnější výroba pomocí vakuové infuze, která ale v případě počátku výroby vyžaduje značné finanční náklady, obdobně jako každý pokročilý výrobní proces.

ZÁVĚR

Cílem práce bylo zkoumání kvality vyrobených vzorků v závislosti na zvolené výrobní technologii. Od začátku bylo předpokládáno, že technologie vakuové infuze a ručního kladení s dolisováním budou dosahovat nejlepších pevnostních hodnot a reprodukovatelnosti kvality.

V případě vakuové infuze se předpoklady potvrdily. Vzorky vyrobené pomocí této technologie většinou dosáhly nejlepších výsledků jak modulů pružnosti E, tak i meze pevnosti v tahu, tlaku i ohybu. Rozptyl naměřených hodnot je menší, než v případě vzorků vyrobených pomocí ručního kladení. Tím lze také posuzovat technologii jako lépe reprodukovatelnou, než ruční kladení, a vykazující lepší mechanické vlastnosti.

Vzorky vyrobené technologií ručního kladení s dolisováním pod vakuovou folií vykazovaly většinou naměřené hodnoty modulů pružnosti E obdobné jako v případě vakuové infuze. Nicméně mez pevnosti v ohybu, tahu i tlaku jsou nejnižší ze všech měření, kromě tlakové zkoušky vzorků vyztužených skelnou tkaninou. Současně mají naměřené hodnoty nejmenší rozptyl naměřených hodnot, tudíž lze technologii považovat za přesnou. Vakuová folie při dotlaku provede rovnoměrné stlačení prosycených vrstev. Hlavním aspektem výroby, na který se musí dbát, je dostatečné prosycení vrstev pryskyřicí. V případě, že bude matrice nadbytek, bude odsátá z výrobku do odsávací rohože při stlačení kompozitu pomocí tlaku vakuovací folie.

Vzorky vyrobené pomocí ručního kladení za mokra dosahovaly mírně nižších hodnot modulů pružnosti E a meze pevnosti, než technologie vakuové infuze. Rozptyl měřených hodnot je někdy až dvojnásobně větší, než u zbylých dvou technologií. Výrobní kvalitu lze tedy brát jako dobrou, nicméně velmi těžce reprodukovatelnou v závislosti na pracovníkovi. Proto je tato technologie vhodnější na výrobu méně zatěžovaných dílů, kde výkyv kvality nemá fatální následky na funkčnost výrobku.

Z pohledu složitosti, rychlosti i kvality výroby lze považovat za nejlepší technologii vakuovou infuzí. Časová náročnost je menší než v případě ručního kladení s dolisováním pod vakuovou folií. Nejsložitější částí je utěsnění vakuovací folie a celého systému, následně je výroba velmi jednoduchá a čistá. Bohužel pomocné materiály jsou poměrně nákladné a některé z nich pouze na jedno použití. Ruční kladení je časově náročné a vrstvení laminátu z více vrstev může znamenat problém s výrobním časem před želatinací pryskyřice. Případně při kladení může docházet ke klouzání vrstev po sobě, nebo k nerovnoměrnému

stlačení. Ruční kladení s dolisováním má základ v ručním kladení za mokra s tím, že je nutné celý systém precizně dotěsnit pomocí vakuovací folie. Tato technologie je tedy kromě velké časové náročnosti také závislá na zručnosti pracovníka, který musí vrstvy dostatečně prosytit, a také utěsnit systém v co nejkratším časovém intervalu tak, aby nedošlo k želatinaci pryskyřice.

Za technologii dosahující nejlepších hodnot ze tří porovnávaných lze tedy považovat vakuovou infuzi. Výroba je poměrně jednoduchá, závislost kvality na pracovníkovi minimální. Bohužel počáteční náklady jsou poměrně vysoké, ale nakoupené stroje lze využít také pro technologii ručního kladení s dolisováním.

Do budoucna by bylo vhodné provést obdobnou výrobu a měření, ale s obměnou počtu pracovníků. Vyrábily by se totožné desky jako v mé práci, např. ve třech dalších sériích, kdy každou ze sérií by vyrobila jiná osoba. Tudíž by se tím dalo zkoumat, jak je která výrobní technologie závislá na zkušenostech pracovníka, zda budou vzorky dosahovat obdobných mechanických vlastností nebo nikoliv. Případně by bylo vhodné použít epoxidovou pryskyřici od jiného výrobce a zkoumat, jak jsou výsledné mechanické vlastnosti materiálu závislé na technologii a druhu pryskyřice, neboť všechny uvedené faktory více či méně ovlivňují výsledné mechanické vlastnosti kompozitních výrobků.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] Doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D. – *přednášky z předmětu Vlastnosti kompozitních materiálů konané ve školním roce 2015/2016*
- [3] Doc. Ing. KOŘÍNEK Zdeněk Csc. *Kompozity*. [online] c 2011 [14. října 2016]. Dostupné na WorldWide Web: <http://mujweb.cz/zkorinek/>
- [4] Bc. VAŇKOVÁ, M. *Měření kríповých vlastností polymerních kompozitů se skleněnou výztuží připravených technologií pultruze: diplomová práce*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. 84 l.
- [5] CUSTOM CARBIDE TOOLS – Custom Carbide Tools Ltd. [online] c 2016 [27. prosinec 2011]. Dostupné na WorldWide Web: <http://customcarbide.com/2011/12/27/custom-tools-achieve-f-35-stealth-characteristics-while-lowering-assembly-and-operating-cost/>
- [6] VYMAZAL, J. *Vliv orientace výztuže na mechanické vlastnosti vybraných kompozitních materiálů: bakalářská práce*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. 71 l., 5 l. příl.
- [7] Humár, A., Píška, M., Janský, M., Podrábský, T., Čech, V. *Technologie zpracování nových kompozitních materiálů tuzemské výroby. Závěrečná zpráva grantového projektu GAČR č.101/98/0855*. Brno: Ústav strojírenské technologie VUTFSI, prosinec 2000. 154s.
- [8] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. 2., přeprac. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008. ISBN 978-80-7043-689-9.
- [9] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [10] Bc. FABRIGER, D. *Technologie výroby sendvičových kompozitních struktur Vakuumovou infuzí pod pružnou folií: diplomová práce*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. 124 l.
- [11] EASYCOMPOSITES – EasyComposites Ltd. [online] c 2016 [7. listopadu 2016]. Dostupné na WorldWide Web: <http://www.easycomposites.co.uk/#/>

- [12] Bc. ŠIŠKA, M. *Studium mechanických vlastností kompozitů z tkaniny Kordcarbon: diplomová práce*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. 81 l., 5 l. příl.
- [13] CompositesWorld. [online] c 2016 [7. listopadu 2016]. Dostupné na WorldWide Web: <http://www.compositesworld.com/articles/double-bag-infusion-attracts-new-customers>
- [14] HAVEL COMPOSITES – Havel Composites CZ s.r.o.. [online] c 2011 [14. října 2016]. Dostupné na WorldWide Web: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>
- [15] Bc. LECIÁN, V. *Studium mechanických vlastností kompozitů na bázi Kordcarbon tkaniny: diplomová práce*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. 112 l.
- [16] ČSN EN ISO 527-4. *Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*
- [17] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Nauka o materiálu*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03927-4.
- [18] Vlastní fotografie a návrhy

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

\bar{X}	Aritmetický průměr [-]
v	Variační koeficient [-]
s	Směrodatná odchylka [-]
E	Modul pružnosti [MPa]
σ_{Mt}	Mez pevnosti v tahu [MPa]
σ_{Md}	Mez pevnosti v tlaku [MPa]
σ_{max}	Mez pevnosti v ohybu [MPa]
W	Práce na mezi pevnosti [J]
ε	Poměrná deformace [%]
MPa	Megapascal
mm	Milimetr
Nmm	Newton milimetr
č.	Číslo
př. n. l.	Před našim letopočtem
bužírka	Dutá izolační trubička z plastické hmoty
USA	United States of America (Spojené státy Americké)
např.	Například
apod.	A podobně
ruční kladení s dolisováním	Ruční kladení s dolisováním pod vakuovou folii / vakem
pozn.	Poznámka
tj.	To je

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Základní dělení kompozitních materiálů podle geometrické formy výztuže [4].....	12
Obr. 2. Rozdělení kompozitů [8]	13
Obr. 3. Synergický efekt [10]	19
Obr. 4. Změna struktury vlákna PAN podle teploty výroby [3]	20
Obr. 5. Postup výroby uhlíkového vlákna z PAN [1]	21
Obr. 6. Výroba skelných vláken [3].....	22
Obr. 7. Náskres zvlákňovací hlavy [3]	23
Obr. 8. Struktura aramidového vlákna [1]	23
Obr. 9. Diagram výroby aramidových vláken [1].....	24
Obr. 10. Plátňová vazba [2]	26
Obr. 11. Keprová vazba [2]	26
Obr. 12. Atlasová vazba [2].....	27
Obr. 13. Sekané prameny [11]	27
Obr. 14. Mleté vlákna [11].....	27
Obr. 15. Pramen skelného vlákna [11]	28
Obr. 16. Skelná tkanina s plátňovou vazbou [11].....	28
Obr. 17. Hybridní tkanina uhlík a aramid s keprovou vazbou [11]	28
Obr. 18. Odsávací rohož [11].....	29
Obr. 19. Vakuová folie při výrobě dílu [13].....	30
Obr. 20. Separáčnická folie [2]	30
Obr. 21. Fotografie distribučních sítěk Airtech [2]	31
Obr. 22. Odtrhová tkanina[11].....	31
Obr. 23. Těsnicí pásy [2]	32
Obr. 24. Pomocné materiály [11].....	32
Obr. 25. Ruční kladení za mokra [14]	33
Obr. 26. Nanášení pomocí stříkání [14].....	34
Obr. 27. Ruční kladení s dolisováním [14].....	35
Obr. 28. Vakuová infuze [14]	36
Obr. 29. Tahové zatížení [6]	37
Obr. 30. Tlakové zatížení [6]	37
Obr. 31. Smykové zatížení [6]	38
Obr. 32. Ohybové zatížení [6]	38

Obr. 33. Vznik trhlin v jednosměrně orientovaném výztuží v závislosti na způsobu zatížení [1].....	39
Obr. 34. Vlákna s křehkým lomem [4]	39
Obr. 35. Syntetické vlákna s houževnatým lomem [4].....	40
Obr. 36. Axiální štěpení vysocepevných vláken [4].....	40
Obr. 37. Diagram zkoušky tahem [15]	41
Obr. 38. zkušební vzorek před a po zkoušce tlakem [17].....	43
Obr. 39. Průběh ohybového momentu trojbodový, čtyřbodový ohyb [1].....	44
Obr. 40. Deska z 8 vrstev skelné tkaniny [18].....	49
Obr. 41. Schéma ručního kladení s dolisováním [18].....	50
Obr. 42. Skládání vrstev na formu [18]	52
Obr. 43. Schéma zapojení vakuové infuze [18].....	53
Obr. 44. Kompozitní desky s uhlíkovou výztuží pro výrobu vzorků [18].....	53
Obr. 45. Nařezané zkušební vzorky (zleva): uhlíková tkanina, skelná tkanina [18]	54
Obr. 46. Pohled na strukturu vzorků: a) ruční kladení, b) ruční kladení s dolisováním, c) vakuová infuze [18].....	55
Obr. 47. Zkušební stroj Zwick 1456 [18]	56
Obr. 48. Zkušební těleso pro tahovou zkoušku [18].....	57
Obr. 49. Fotografie tahové zkoušky vzorku uhlíkového kompozitu [18].....	57
Obr. 50. Tahová zkouška uhlíkový kompozit - vakuová infuze.....	58
Obr. 51. Tahová zkouška uhlíkový kompozit - ruční kladení s dolisováním	59
Obr. 52. Tahová zkouška uhlíkový kompozit - ruční kladení za mokra.....	60
Obr. 53. Tahová zkouška skelná tkanina - vakuová infuze	61
Obr. 54. Tahová zkouška skelná tkanina - ruční kladení s dolisováním	62
Obr. 55. Tahová zkouška skelná tkanina - ruční kladení za mokra	63
Obr. 56. Přípravek proti vybočení zkušební tělesa [18]	66
Obr. 57. Zkušební těleso pro zkoušku tlakem [18].....	66
Obr. 58. Tlaková zkouška uhlíkový kompozit - vakuová infuze.....	67
Obr. 59. Tlaková zkouška uhlíkový kompozit - ruční kladení s dolisováním	68
Obr. 60. Tlaková zkouška uhlíkový kompozit - ruční kladení za mokra.....	69
Obr. 61. Tlaková zkouška skelná tkanina - vakuová infuze	70
Obr. 62. Tlaková zkouška skelná tkanina - ruční kladení s dolisováním	71
Obr. 63. Tlaková zkouška skelná tkanina - ruční kladení za mokra.....	72

Obr. 64. Lom vzorku vhodný pro vyhodnocení měření [18].....	73
Obr. 65. Zkušební těleso pro ohybovou zkoušku [18].....	75
Obr. 66. Fotografie ohybové zkoušky vzorku uhlíkového kompozitu [18].....	75
Obr. 67. Ohybová zkouška uhlíkový kompozit - vakuová infuze	76
Obr. 68. Ohybová zkouška uhlíkový kompozit - ruční kladení s dolisováním	77
Obr. 69. Ohybová zkouška uhlíkový kompozit - ruční kladení za mokra	78
Obr. 70. Ohybová zkouška skelná tkanina - vakuová infuze.....	79
Obr. 71. Ohybová zkouška skelná tkanina - ruční kladení s dolisováním.....	80
Obr. 72. Ohybová zkouška skelná tkanina - ruční kladení za mokra	81

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Vlastnosti vybraných matric [9]	17
Tabulka 2. Porovnání vybraných druhů vláken [1]	24
Tabulka 3. Porovnání vybraných přírodních vláken se skelným vláknem [1, s62].....	25
Tabulka 4. Naměřené průměrné hodnoty tloušťek vzorků t [18].....	55
Tabulka 5. Zkouška tahem uhlíková tkanina - vakuová infuze	58
Tabulka 6. Zkouška tahem uhlíková tkanina - ruční kladení s dolisováním	59
Tabulka 7. Zkouška tahem uhlíková tkanina - ruční kladení za mokra.....	60
Tabulka 8. Zkouška tahem skelná tkanina - vakuová infuze	61
Tabulka 9. Zkouška tahem skelná tkanina - ruční kladení s dolisováním	62
Tabulka 10. Zkouška tahem skelná tkanina - ruční kladení za mokra.....	63
Tabulka 11. Porovnání výsledných hodnot tahových zkoušek kompozitů z uhlíkové tkaniny	64
Tabulka 12. Porovnání výsledných hodnot tahových zkoušek kompozitů ze skelné tkaniny	65
Tabulka 13. Zkouška tlakem uhlíková tkanina - vakuová infuze	67
Tabulka 14. Zkouška tlakem uhlíková tkanina - ruční kladení s dolisováním	68
Tabulka 15. Zkouška tlakem uhlíková tkanina - ruční kladení za mokra.....	69
Tabulka 16. Zkouška tlakem skelná tkanina - vakuová infuze.....	70
Tabulka 17. Zkouška tlakem skelná tkanina - ruční kladení s dolisováním.....	71
Tabulka 18. Zkouška tlakem skelná tkanina - ruční kladení za mokra.....	72
Tabulka 19. Porovnání výsledných hodnot tlakových zkoušek kompozitů z uhlíkové tkaniny	73
Tabulka 20. Porovnání výsledných hodnot tlakových zkoušek kompozitů ze skelné tkaniny	74
Tabulka 21. Zkouška ohybem uhlíková tkanina - vakuová infuze	76
Tabulka 22. Zkouška ohybem uhlíková tkanina - ruční kladení s dolisováním	77
Tabulka 23. Zkouška ohybem uhlíková tkanina - ruční kladení za mokra.....	78
Tabulka 24. Zkouška ohybem skelná tkanina - vakuová infuze.....	79
Tabulka 25. Zkouška ohybem skelná tkanina - ruční kladení s dolisováním.....	80
Tabulka 26. Zkouška ohybem skelná tkanina - ruční kladení za mokra.....	81
Tabulka 27. Porovnání výsledných hodnot ohybových zkoušek kompozitů z uhlíkové tkaniny	82

Tabulka 28. Porovnání výsledných hodnot ohybových zkoušek kompozitů ze skelné tkaniny	83
Tabulka 29. Cena základního materiálu na výrobu kompozitní desky.....	84
Tabulka 30. Cena za výrobu pomocí ručního kladení za mokra	85
Tabulka 31. Cena za výrobu pomocí ručního kladení s dolisováním.....	85
Tabulka 32. Cena za výrobu pomocí vakuové infuze.....	85
Tabulka 33. Porovnání cen a časové náročnosti	86

SEZNAM PŘÍLOH

- 1 - Polivaks EKO
- 2 - Technický list pryskyřice L285 (MGS) + tužidlo L285
- 3 - Uhlíková tkanina KORDCARBON CC600 600g/m²
- 4 - Skelná Tkanina Aeroglass 200g/m²
- 5 - Dílčí výsledky tahových zkoušek
- 6 - Dílčí výsledky tlakových zkoušek
- 7 - Dílčí výsledky ohybových zkoušek

TECHNICKÝ LIST

Datum vydání: 30. 5. 2002
Datum revize: 2.2.2017

stránka 1/3
Verze 1.2

Separátor PVA - ECO

Popis

Separátor PVA - ECO je tekutý produkt, zabraňující přilnutí dvou materiálů k sobě. Používá se především pro odseparování výrobků z kompozitních a kovových forem. Separátor PVA je též vhodné kombinovat se separačním voskem. Při těchto sdružených aplikacích je separační základový vosk použit jako první vrstva a potom jako druhá vrstva je aplikován separátor PVA.

Použití

Nejspolehlivější metodou separace je nejprve rozleštit nanesený primární vosk měkkým hadříkem tak, aby nedošlo k poškrábání a teprve potom aplikovat separátor PVA. Forma a vosk by měly být zahřáty na pokojovou teplotu (cca 20 - 25 °C). Nové formy se voskují 5 - 10x. To je důležité pro zalepení všech mikropórů na formě. Separátor PVA aplikujeme houbičkou nebo savým hadříkem tak, že nanášíme rovnoměrnou tenkou vrstvu rovnoměrnými tahy jedním směrem. Bezprostředně po nanesení vrstvy separátoru je vhodné houbičku vyždímat a celou operaci zopakovat. Nová vrstva separačního vosku i separátoru PVA se aplikuje vždy znovu po každém vyloupení výrobku z formy.

Separátor PVA aplikujeme pouze na čisté povrchy bez oleje a mastnoty. Pokud není toto pravidlo dodrženo, dochází k tzv. efektu "očkování", kdy separátor nepřilne dobře k povrchu formy a následná separace tak není zajištěna. Stejně nevhodné jsou porézní povrchy jako je pěna, dřevo a další. Tyto materiály musí být nejprve zalakovány a zavoskovány. Při předúpravě kompozitních forem leštěním se tyto elektrostaticky nabíjí. Přitahují tak částičky prachu z okolního ovzduší a ty následně znečišťují povrch. Doslova všechno, co padá z okolí se akumuluje ve filmu separátoru, zvláště během zasychání v čase cca 15 minut. Proto se před separací ujistěte, že vzduch je bez prachu.

Separátor PVA je rovněž vhodný pro separaci komponentů, vytvrzovaných při vyšších teplotách. Teploty pro vytvrzování by však neměly přesáhnout 100°C. Nové formy je nejlepší vytvrzovat při zvýšené teplotě s první vrstvou vosku. Zvýšená teplota rovněž způsobuje, že vosk pronikne do povrchu kompozitní formy.

Po aplikaci zasychá separátor do 20ti minut (při pokojové teplotě) a vytváří vysoce lesklý povrch. Zbytky na formě a výrobku lze snadno odstranit vodou.

Vlastnosti

Separátor PVA Havel je čirá kapalina slabého rozpouštědlového zápachu. Chemicky se jedná o roztok polyvinylalkoholu ve vodnoalkoholickém prostředí. Je to hořlavá kapalina I. Třídy nebezpečnosti. Po uschnutí vytvoří lesklý, tuhý, fólii podobný lakový film. Vhodný je pro separaci epoxidové, polyesterové, vinylesterové a polyamidové pryskyřice.

Balení

Separátor PVA - ECO je balen po 1 litru.

Skladování

Separátor se skladuje v dobře uzavřených obalech, aby se zabránilo těkání rozpouštědel a vysychání. Optimální teplota skladování je 5-20°C. Výrobek nesmí projít mrazem a neměl by být vystavován dlouhodoběji teplotám nad 35 °C. Záruční doba je 6 měsíců od data expedice.

Technické parametry

Skupenství	kapalina
Barva	Čirá/modrá transparentní
Zápach	alkoholický
Rozpouštědlo	Směs vyšších alkoholů a vody
Aplikace	Nanést houbičkou, nechat uschnout.
Rozpustnost/ředitelnost	Voda, alkoholy, glycerol, triethylenglykol
Teplota pracovní použitelnosti	15 - 120 °C
Tlak par při 20 °C	> 1150 mbar
Základy bezpečnosti	Odsávejte výpary, při práci nekuřte.
Nutné ochranné pomůcky	Více s BL

Obecná pravidla

Při vyšších teplotách a slabších vrstvách osychá separátor PVA podstatně rychleji. Dodržujte při práci předpisy pro manipulaci s hořlavinami.

Informace

Další případné informace o výrobku vám poskytneme na telefonním čísle: +420 585 129 011 nebo 585 129 025

Objednávky

tel. +420 585 129 011

e-mail info@havel-composites.cz , www.havel-composites.cz

PŘÍLOHA P 2: PRYSKYŘICE L285 (MGS) + TUŽIDLO L285

1

LAMINAČNÍ PRYSKYŘICE L 285 TUŽIDLA 285, 286, 287

Návod k použití, technické listy

Charakteristika

Schválení:	Německý federální úřad pro letectví
Použití:	výroba kluzáků, motorových kluzáků a motorových letadel, lodě a stavba lodí, sportovní náradí, letecké modely, formy a nástroje
Teplotní odolnost výrobků bez výrazných změn jejich parametrů:	- 60 °C - □ + 50-60 °C za temperování - 60 °C - □ + 80-+ 100 °C po temperování
Zpracování:	Při teplotách mezi 10 °C a 50 °C Všechny běžné metody zpracování
Zvláštní vlastnosti:	Extremně dobrá fyziologická kompatibilita Dobré mechanické a tepelné vlastnosti Doba zpracovatelnosti (tzv. pot life) od přibližně 45 minut do asi 5 hodin (závisí na použitém tužidle)
Zvláštní úpravy:	L 285 T: tixotropní L 285 K2: tixotropní tepelná úprava L 285 W: bílá

Použití

Systém laminační pryskyřice, schválený německým federálním úřadem pro letectví, má rozdílné doby zpracovatelnosti (v závislosti na použitém tužidle) pro výrobu s použitím skelných, uhlíkových a kevlarových vláken a vyznačuje se vysokými statickými a dynamickými vlastnostmi.

Po tepelném vytvrzení při 50 - 55 °C systém splňuje standard pro větroně a motorové větroně (pracovní teplota - 60 °C až + 54 °C. Pro splnění požadavků motorových letadel (pracovní teploty - 60 °C až + 72 °C) je nezbytné tepelné vytvrzení při 80 °C.

Rozmezí doby zpracovatelnosti (tzv. pot life) je mezi přibližně 45 min. a 5 h v závislosti na druhu tužidla. Tužidla mají stejný poměr míchání a mohou být míchány mezi sebou v jakémkoli poměru. Toto dovoluje výběr optimálního systému pro všechny metody zpracování. Po počátečním vytvrzení při pokojové teplotě jsou vyrobené komponenty opracovatelné a lze je vytáhnout z formy. Získáte vysoce se lesknoucí a nelepivé povrchy, a to dokonce i při nepříznivých podmínkách při vytvrzování, tj. nižší teploty nebo vysoká vlhkost.

Viskozita směsi zaručuje rychlé a dokonalé prosycení vláken, nicméně, pryskyřice se nerozlije na tkanině na vertikálním povrchu. Za účelem získání zvláštních vlastností je rovněž možné přidat ke směsi pryskyřice/tužidlo nejrůznější plniva, např. aerosil, mikrobalyony, bavlněné vločky, kovový prášek apod.

Pokud se nevyžaduje vysoká tepelná odolnost či letecké schválení, dá se tužidlo 285 použít bez následného temperování. Nicméně, uvedené vlastnosti získá pouze po tepelném vytvrzení při teplotách nad 50 °C.

Použití

Laminační systém má hydrofilní charakter (vyšší absorpce vlhkosti, nižší odpor rozptylu páry). Proto neočekáváme žádné problémy kompatibility při jeho kombinaci s polyesterovými gelcoaty, rozmanitými barvami (např. na bázi PUR) atd. Bohužel však nemáme k dispozici testy těchto kombinací.

Od svého schválení v roce 1985 byl laminační systém L 285 používán téměř všemi výrobci letadel a kluzáků a - zvláště kvůli své extrémně dobré fyziologické kompatibilitě - je nejvíce užívaným systémem dnešního leteckého průmyslu. Často se stává, že pracovníci, kteří zaznamenali problémy s některými epoxidy (alergie či podráždění pokožky), jsou schopni zpracovávat laminační pryskyřici L 285.

Je nutno dodržovat příslušná bezpečnostní pokyny pro manipulaci s epoxidovými pryskyřicemi a tužidlo a naše instrukce pro bezpečné zpracování.

Specifikace

		Laminační pryskyřice L 285
Hustota °C	g/cm ³ / 25	1,18 - 1,23
Viskozita °C	mPas / 25	600 - 900
Ekvivalent epoxidu	-	165 - 170
Hodnota epoxidu	-	0,59 - 0,65
Barva Gardner		max 3

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

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

Podrobnosti pro zpracování

	Pryskyřice L 285	Tužidlo 285	Tužidlo 286	Tužidlo 287
Průměrná EP - hodnota	0,62	-	-	-
Průměrný ekvivalent aminu	-	64	64	64

Technické informace o zesílené pryskyřici

Statické testy

Vytvrzení: 24 h při 23 °C + 15 h při 80 °C		G R C Sklenné vlákno G F K	C R C Uhlík. vlákno C F K	S R C Kevlar.vlákno S F K
Pevnost v ohybu 10 ³	psi x	74 - 81 510 - 560	104 - 112 720 - 770	51 - 55 350 - 380
	N/mm ²			
Pevnost v tahu 10 ³	psi x	67-73 460 - 500	74 - 80 510 - 550	58 - 70 400 - 480
	N/mm ²			
Pevnost v tlaku 10 ³	psi x	59 - 64 410 - 440	67 - 74 460 - 510	20 - 23 140 - 160
	N/mm ²			
Pevnost ve střihu 10 ³	psi x	6,1 - 6,7 42 - 46	6,8 - 8,0 47 - 55	4,2 - 4,9 29 - 34
	N/mm ²			
Modulus pružnosti 10 ³	psi x	2,9 - 3,5 20 - 24	5,8 - 6,5 40 - 45	2,3 - 2,8 16 - 19
	N/mm ²			
<p>GRC vzorky: 16 vrstev sklené tkaniny, 8 H satén, 296 g/m², 4 mm silné CRC vzorky: 8 vrstev uhlíkové tkaniny, plátno, 200 g/m², 2 mm silné SRC vzorky: 15 vrstev kevlarové tkaniny, 4H satén, 170 g/m², 4 mm silné</p> <p>Obsah vláken ve vzorcích během výroby/testování: 40 - 45 vol% Data propočítaná na obsah vláken 43 vol%</p> <p>Typická data dle WL 5.3203 Části 1 a 2 Manuálu o německých leteckých materiálech.</p>				

Míchací poměry

	Pryskyřice L 285: Tužidlo 285, 286, 287
Složky váhově	100 : 40 (+/-2)
Složky objemově	100 : 50 (+/-2)

Gel time

- nános do vrstvy 1 mm při různých teplotách

	Tužidlo 285	Tužidlo 286	Tužidlo 287
20 - 25 °C	příbl. 2 - 3 hod.	příbl. 3 - 4 hod.	příbl. 5 - 6 hod.
40 - 45 °C	příbl. 45 - 60 min.	příbl. 60 - 90 min.	příbl. 80 - 120 min

Mechanická data nezesílené pryskyřice

Hustota	g/cm ³	1,18 - 1,20
Pevnost v ohybu	psi x 10 ³ N/ mm ²	16 - 18 110 - 120
Modul pružnosti	psi x 10 ⁵	4,6 - 4,8 3,0 - 3,3
kN/mm ²		
Pevnost v tahu	psi x 10 ³	10 - 11,5
kN/mm ²		70 - 80
Pevnost v tlaku	psi x 10 ³	18 - 20
kN/mm ²		120 - 140
Průtažnost	%	5 - 6,5
Síla nárazu		45 - 55
Nmm/mm ²		
Pevnost ve stříhu	D	80 - 85
Absorpce vody %	24 h 23 °C 7 d/ 23 °C	0,20 - 0,30 0,60 - 0,80
Odolnost proti únavě pod tlakem na obrácený ohyb dle DLR Brunsw.	10 % 90 %	2 X 10 ⁴ 2 X 10 ⁶
Vytvrzení:	24 h při 23 °C + 15 h při 60 °C	
Typická data dle WL 5.3203 Části 1 a 2 Manuálu o německých leteckých materiálech		

LAMINAČNÍ PRYSKYŘICE L 285 TUŽIDLO 500

Charakteristika

Schválení:	—
Použití:	Výroba kompozitních prvků Lodě a stavba lodí Sportovní nářadí Letecké modely Formy a nástroje
Teplotní odolnost výrobků bez výrazných změn jejich parametrů:	60 °C - □ + 50 - 60 °C bez tepelného vytvrzení
Zpracování:	Při teplotách mezi 10 °C a 40 °C Všechny obvyklé výrobní postupy
Zvláštní vlastnosti:	Extremně dobrá fyziologická kompatibilita, dobré mechanické vlastnosti, velmi krátké doby vytvrzení dokonce i při nízké teplotě
Zvláštní úpravy:	L 285 T: tixotropní L 285 K2: horká tixotropní úprava L 285 W: bílá

Použití

Jedná se o systémy laminačních pryskyřic s nízkou viskozitou neobsahující rozpouštědla či plniva určená pro zpracování a vytvrzování při pokojové teplotě. Vhodná pro výrobu dílů se zesílením skelnými, uhlíkovými a aramidovými vlákny, jejichž rysy jsou vysoká statická a dynamická nosnost.

Doba zpracovatelnosti (tzv. pot life) je přibližně 10 - 15 min. Laminačení pryskyřice L 285 v kombinaci s tužidlem 500 se vyznačuje velmi krátkou dobou vytvrzení, a to i při nízkých teplotách (dobré vytvrzení je zajištěno při teplotách začínajících u + 10 °C) Dokonce i při nepříznivých vytvrzovacích podmínkách, jako je nízká teplota či vysoká relativní vlhkost lze dosáhnout nelepivých povrchů s vysokým leskem.

Viskozita směsi byla upravena tak, že pryskyřice nestéká z tkanin rozložených na vertikálním povrchu.

Díky svým výborným přilnavým vlastnostem se tyto systémy rovněž dají použít jako adheziva pro dřevo, kov, sklo, beton a nesčetné druhy plastů. Tixotropní úprava (např. laminační pryskyřice L 285 T) je upřednostňována pro silnější adhezivní spoje a vertikální povrchy. Plniva (např. kovový prášek, prach, bavlněné vločky apod.) mohou být přimíchána pro dosažení speciálních vlastností systému.

Kvůli průtažnosti 4 - 7 %, což je výhodné při použití jako laminační pryskyřice, je pevnost ve stříhu a odolnost proti odloupení o něco nižší než u našich speciálních adhezivních pryskyřic:

Adhezivní pryskyřice L 135 / K2 a

Adhezivní pryskyřice A 10 / A 20.

Všeobecným pravidlem při aplikaci všech adhezivních látek je pečlivá příprava povrchu, která je základním předpokladem dobré adheze. Zbytky rozpouštědel a nečistoty jako je prach, mastnota či kapky vody znemožní dobrou vazbu.

Specifikace

		Laminační pryskyřice L 285
Hustota °C	g/cm 3 / 25	1,18 - 1,23
Viskozita °C	mPas / 25	600 - 900
Ekvivalent epoxidu	-	165 - 170
Hodnota epoxidu	-	0,59 - 0,65
Barva Gardner		max 3

		Tužidlo 500
Hustota °C	g/cm 3 / 25	1,00 - 1,06
Viskozita °C	mPas / 25	200 - 350
Hodnota aminu	mg KOH / g	350 - 400
Barva Gardner		max 5

Podrobnosti pro zpracování

	Laminační pryskyřice L 285	Tužidlo 500
Průměrná hodnota epoxidu	0,63	-
Průměrný ekvivalent aminu	-	62
Skladování	□ 12 měsíců v originálním obalu	
Teplota zpracování při	10 - 50 °C	
Vytvrzování	Vytvrzování při pokojové teplotě nebo vytvrzování ve formě při vysokých teplotách.	
Temperování	Není nezbytné - možno při 50 °C - □ 150 °C	

Skladování

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

Nárůst teploty

Optimální teplota při zpracování je v rozmezí mezi 20 a 25 °C. Vyšší teploty zpracování jsou možné, ale zkracují dobu zpracovatelnosti. Nárůst teploty o 10 °C zkrátí dobu zpracovatelnosti na polovinu. Voda (například velmi vysoká vlhkost nebo voda obsažená v plnivech) může způsobit zrychlení reakce pryskyřice / tužidlo. Rozdílné teploty a vlhkosti během zpracování nemají význačný efekt na pevnost vytvrzeného výrobku.

Nemíchejte velká množství, zvláště u tohoto vysoce reaktivního systému. Teplo sálající z nádoby, v níž dochází ke smísení, je velmi nízké, takže kvůli reakčnímu teplu (exotermická reakce pryskyřice-tužidlo) se obsah velmi rychle zahřeje. Mohou vzniknout teploty i vyšší než 200 °C, které mohou způsobit intenzivní hoření směsi pryskyřice a tužidla za výskytu kouře.

Gel time

- nános vrstvy o tloušťce 1 mm při různých teplotách

20 - 25 °C	přibližně 45 - 60 min.
40 - 45 °C	přibližně 20 - 30 min.

Míchací poměry

Pryskyřice L 285 : Tužidlo 500	
Složky váhově	100 : 40 (+/-2)
Složky objemově	100 : 50 (+/-2)

Specifikované poměry míchání musejí být co nejpřesněji dodrženy. Přidání více či méně tužidla nebude mít efekt na rychlejší či pomalejší reakci - pouze nedostatečné vytvrzení, které nelze žádným způsobem opravit.

Směs pryskyřice a tužidla je nutno velice pečlivě promíchat. Míchejte, dokud nebude směs zcela jednotné barvy. Zvláštní péči věnujte stěnám a dnu nádoby, v níž směs mícháte.

Laminační pryskyřice L 285 - Tužidlo 500	
Max T _G pro vytvrzování při 18 °C	40 - 45 °C
Max T _G pro vytvrzování při 25 °C	50 - 60 °C
Max T _G pro vytvrzování při 50 °C	60 - 65 °C

DSC DIN 51007

Mechanická data nezesílené pryskyřice

Hustota	g/cm ³	1,18 - 1,20
Pevnost v ohybu 10 ³	psi x N/ mm ²	17 - 20 120 - 140
Modul pružnosti 10 ⁵	psi x kN/mm ²	4,8 - 5,1 3,3 - 3,5
Pevnost v tahu 10 ³	psi x kN/mm ²	10 - 11,5 70 - 80
Pevnost v tlaku 10 ³	psi x kN/mm ²	18 - 20 120 - 140
Průtažnost	%	5 - 6,5
Síla Nmm/mm ²	nárazu	40 - 50
Tvrдость D	ve stříhu	86 - 90
Absorpce vody % °C	24 h 23 °C 7 d/ 23 °C	0,10 - 0,20 0,20 - 0,50
Odolnost proti únavě pod tlakem na obrácený ohyb dle DLR Brunsw. 10 % 90 %		□ 2 X 10 ⁶ □ 2 X 10 ⁶
Vytvrzení:	24 h při 23 °C	+ 15 h při 50 °C
Zastupující data dle WL 5.3203 Části 1 a 2 Manuálu o německých leteckých materiálech		

POZNÁMKA:

Překlad byl pořízen doslovně z manuálu "TECHNICKÉ INFORMACE" vydaného firmou MGS Kunstharzprodukte GmbH. Podrobnější či upřesňující informace Vám rádi podáme na telefonním čísle 585 129 011, na GSM: 603 847 655 (p.Havel) nebo 603 841 749 (p.Šuran).

PŘÍLOHA P 3: UHLÍKOVÁ TKANINA KORDCARBON CC600 600G/M²



Inspection Certificate 3.1

EN 10 204: 2004

Certificate No.: C0130101

Material Code: TOR003901
Material Designation: **CC 600 T - 120**
Manufacturing Date: 5.3.2015
Article no.: CA0054-641-0001
Test roll No.: C0130101
Finish: loomstate

Kind of material - warp: Toray 12K 800 tex
Kind of material - weft: Toray 12K 800 tex
Compatibility: epoxid, vinylester, polyester
Binding: twill 2/2

Results of specific tests according to Specification No.:		TOR003901				
Characteristic	Unit	Target values	Tolerance (min. - max.)		Test results	Note
Sett of warp	n/m	370	365	375	* 370	DIN EN 1049-2
Sett of weft	n/m	370	365	375	* 380	DIN EN 1049-2
Thickness	mm	0,9	0,8	1	* 0,96	DIN EN 5084
Area weight	g/m ²	600	595	620	615	DIN EN 12127
Width	cm	120	119,5	121	* 119,0	DIN EN 1773
Density TOR 12 K 800 tex:	g/cm ³	2				

* orientation value

Corresponds to the batch no.: C01301



Address of Manufacturer:
KORDÁRNA Plus a.s.
696 74 Velká nad Veličkou 890
Czech Republic

Contact of Techn. Dept.: Kučera Jiří, +420 518 312 528
+ 420 518 329 302, kucera.j@kordama.cz

PŘÍLOHA P 4: SKELNÁ TKANINA AEROGLASS 200G/M²



Technický list

Skelná tkanina 200 g/m²

AEROGLASS

Pltáno

Váha na jednotku plochy		200 g/m ² +/- 15 g
Vazba		plátno
Kraje		stříhané
Hustota cm	osnova	16 +/- 1
Hustota cm	útek	13 +/- 1
Použitá lubrikace		přímá silanová
Pevnost v tahu N/50*200 mm	osnova	≥ 900
	útek	≥ 860
Šíře cm		100 +/- 2cm
Délka tkanina / 1 role m		100 m +/- 1 cm
Doporučená skladovatelnost	teplota	Do 16° C
	vlhkost	Do 48 %
Nábal	Papírová dutinka	Vnitřní průměr 76 mm
Balení		Polyethylenová folie

Havel Composites CZ, s.r.o., Svědlice 67, Přáslavice, 783 54

Tel.: 585 129 010, Fax 585 129 040,

www.havel-composites.cz, info@havel-compositec.cz

PŘÍLOHA P 5: DÍLČÍ VÝSLEDKY TAHOVÝCH ZKOUŠEK

Matrice: Havel L285, Výztuž: Uhlíková tkanina - 4 vrstvy

Vakuová infuze				
Zkušební těleso	E [MPa]	σ_{Mt} [MPa]	ε při σ_{Mt} [%]	W při σ_{Mt} [Nmm]
1	52 800	539	1,4	2 716,48
2	50 700	611	1,8	3 772,51
3	51 300	597	1,9	3 829,28
4	68 300	563	1	1 999,04
5	50 100	568	1,7	3 144,26
6	66 700	619	1,5	3 013,59
7	55 500	561	1,6	3 482,55
8	53 800	534	2,3	5 039,39
9	57 700	619	1,4	3 342,1
10	58 200	570	1,4	2 606,36
11	53 900	608	1,6	3 601,09
Ruční kladení s dolisováním				
Zkušební těleso	E [MPa]	σ_{Mt} [MPa]	ε při σ_{Mt} [%]	W při σ_{Mt} [Nmm]
1	46 500	317	1,3	1 126,42
2	57 000	365	2	2 580,27
3	53 900	340	1,7	1 973,38
4	53 600	335	1,4	1 381,53
5	61 400	304	1	979,83
6	64 900	357	1,3	1 536,1
7	63 600	415	1,3	1 596,09
8	61 400	364	0,8	1 015,44
9	58 300	332	1	1 090,85
10	57 300	376	1,5	1 784,72
11	45 500	335	1,1	1 285,78
12	46 300	329	1,5	1 305,08
13	55 400	371	1,5	2 000,88

Ruční kladení				
Zkušební těleso	E [MPa]	σ_{Mt} [MPa]	ε při σ_{Mt} [%]	W při σ_{Mt} [Nmm]
1	91 000	537	0,8	1 271,91
2	48 000	556	1,5	2 914,52
3	40 500	597	1,6	1 306,5
4	44 300	507	1,4	2 133,65
5	43 400	548	1,5	2 679,51
6	59 500	547	1,2	1 915,32
7	54 400	572	1,1	1 842,66
8	51 400	568	1,7	3 434,33
9	40 500	543	1,7	3 081,57
10	54 500	571	1,5	2 674,56
11	55 500	550	1,3	2 298,21

Matrice: Havel L285, Výztuž: Skelná tkanina - 8 vrstev

Vakuová infuze				
Zkušební těleso	E [MPa]	σ_{Mt} [MPa]	ε při σ_{Mt} [%]	W při σ_{Mt} [Nmm]
1	15 100	346	2,6	4 914,97
2	14 800	332	2,6	4 472,48
3	11 700	354	2,8	5 432,35
4	13 400	329	2,5	4 290,97
5	17 100	350	2,7	5 295,62
6	13 600	354	2,7	5 214,24
7	12 500	314	2,8	4 604,92
8	16 300	345	2,3	4 638,67
9	13 500	339	2,6	4 721,62
10	16 800	302	2,3	3 787,43
Ruční kladení s dolisováním				
Zkušební těleso	E [MPa]	σ_{Mt} [MPa]	ε při σ_{Mt} [%]	W při σ_{Mt} [Nmm]
1	10 800	313	2,8	4 659,92
2	14 100	269	2,2	3 346,21
3	13 600	302	2,7	4 264,06
4	12 900	292	2,7	4 306,87
5	15 600	273	2,2	3 314,05

6	16 100	260	2,2	3 046,99
7	12 400	292	3,1	4 400,37
8	13 400	314	2,7	4 369,8
9	15 600	305	2,6	4 297,78
10	11 500	326	3,2	4 983,28
Ruční kladení za mokra				
Zkušební těleso	E [MPa]	σ_{Mt} [MPa]	ε při σ_{Mt} [%]	W při σ_{Mt} [Nmm]
1	13 300	320	3	6 001,65
2	11 900	285	2,8	4 662,43
3	12 400	314	3,1	6 089,48
4	12 800	312	2,9	5 616,31
5	12 900	298	2,6	4 998,64
6	14 100	296	2,7	5 039,97
7	11 200	326	3,5	6 630,82
8	12 200	300	3,1	5 474,61
9	14 200	287	2,4	4 372,71
10	13 200	301	2,7	5 099,22

PŘÍLOHA P 6: DÍLČÍ VÝSLEDKY TLAKOVÝCH ZKOUŠEK

Matrice: Havel L285, Výztuž: Uhlíková tkanina - 4 vrstvy

Vakuová infuze				
Zkušební těleso	E [MPa]	σ_{Md} [MPa]	ϵ při σ_{Md} [%]	W při σ_{Md} [Nmm]
1	24 500	244	1,4	858,85
2	23 300	224	1,2	732,76
3	21 800	232	1,7	780,07
4	20 900	208	1,5	699,09
5	26 600	296	1,4	1 073,86
6	21 700	206	1,2	578,92
7	17 600	230	1,5	792,83
8	17 300	236	1,5	898,11
9	19 100	255	1,6	1 007,43
10	20 700	253	1,8	958,69
Ruční kladení za s dolisováním				
Zkušební těleso	E [MPa]	σ_{Md} [MPa]	ϵ při σ_{Md} [%]	W při σ_{Md} [Nmm]
1	15 000	128	1,5	305,41
2	20 200	186	2,9	1 493,49
3	22 400	165	1,2	326,2
4	19 300	157	3,5	1 651,69
5	21 700	180	1,2	459,84
6	17 400	155	0,9	268,41
7	13 300	141	1,6	277,33
8	16 600	194	3,5	1 970,92
Ruční kladení za mokra				
Zkušební těleso	E [MPa]	σ_{Md} [MPa]	ϵ při σ_{Md} [%]	W při σ_{Md} [Nmm]
1	20 200	287	5,8	5 842,93
2	15 000	203	2,3	1 246,89
3	23 700	195	1,1	487,98
4	24 600	264	1,6	924,42
5	15 900	142	1,3	424,84
6	10 000	181	2,9	1 568,88

Matrice: Havel L285, Výztuž: Skelná tkanina - 8 vrstev

Vakuová infuze				
Zkušební těleso	E [MPa]	σ_{Md} [MPa]	ϵ při σ_{Md} [%]	W při σ_{Md} [Nmm]
1	11 900	126	1,3	274,31
2	12 900	155	2,9	906,99
3	11 700	146	4,8	1 738,89
4	13 500	152	1,6	397
5	12 000	145	3,2	969,87
6	12 300	139	2,4	643,68
7	12 700	165	4,3	1 440,98
Ruční kladení s dolisováním				
Zkušební těleso	E [MPa]	σ_{Md} [MPa]	ϵ při σ_{Md} [%]	W při σ_{Md} [Nmm]
1	16 900	164	1,5	329,42
2	14 800	150	3,2	842,74
3	15 300	146	1,3	220,59
4	13 500	157	1,6	318,53
5	12 600	146	1,8	297,6
6	15 800	172	4	1 187,92
7	16 200	163	1,9	444,71
8	11 300	154	1,7	319,46
9	10 900	154	2,2	478,85
10	17 000	147	1,4	252,63
11	14 100	148	1,4	322,04
12	14 100	153	1,8	316,65
13	17 000	176	3,4	940,14
Ruční kladení za mokra				
Zkušební těleso	E [MPa]	σ_{Md} [MPa]	ϵ při σ_{Md} [%]	W při σ_{Md} [Nmm]
1	10 400	163	4,4	1 440,06
2	14 300	143	3	852,25
3	11 200	131	2,3	653,09
4	13 800	133	3,9	1 096,32
5	12 500	116	1,2	217,56
6	10 100	122	1,5	287,65
7	12 000	135	1,5	360,01

8	12 300	142	1,7	358,73
9	12 200	147	3,4	1 087,42

PŘÍLOHA P 7: DÍLČÍ VÝSLEDKY OHYBOVÝCH ZKOUŠEK

Matrice: Havel L285, Výztuž: Uhlíková tkanina - 4 vrstvy

Vakuová infuze				
Zkušební těleso	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	ε při σ_{\max} [%]	W při σ_{\max} [Nmm]
1	38 700	455	2	2 746,52
2	38 100	550	1,5	1 912,12
3	39 300	543	1,6	2 363,73
4	38 100	447	1,6	2 163,05
5	37 900	469	1,5	1 922,98
6	38 800	423	1,5	1 871,34
7	38 900	393	1,6	2 072,47
8	35 800	482	1,9	2 396,96
9	39 100	506	1,6	2 195,96
10	38 800	455	1,3	1 484,24
Ruční kladení s dolisováním				
Zkušební těleso	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	ε při σ_{\max} [%]	W při σ_{\max} [Nmm]
1	41 400	353	0,9	653,45
2	44 300	263	0,8	495,37
3	42 000	243	0,7	342,48
4	45 300	279	0,9	609,67
5	45 900	307	0,9	640,87
6	39 900	277	0,9	544,98
7	43 400	293	0,9	677,36
8	39 400	260	0,9	613,24
9	42 800	254	0,9	545,01
10	44 500	265	0,8	522,41
Ruční kladení za mokra				
Zkušební těleso	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	ε při σ_{\max} [%]	W při σ_{\max} [Nmm]
1	33 400	524	1,5	1 856,46
2	30 300	415	2	2552,2
3	28 500	371	1,5	1 364,85
4	20 200	293	2,1	1844,1
5	19 800	252	1,5	1 036,97
6	33 500	430	1,3	1 295,83

7	41 900	581	1,4	2 001,38
8	32 400	433	1,5	1 704,68
9	32 600	514	1,7	2 126,24
10	38 500	513	1,5	1 929,35

Matrice: Havel L285, Výztuž: Skelná tkanina - 8 vrstev

Vakuová infuze				
Zkušební těleso	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	ε při σ_{\max} [%]	W při σ_{\max} [Nmm]
1	15 000	180	1,9	604,9
2	15 400	211	1,8	621,52
3	15 800	207	1,7	558,35
4	14 700	236	2	739,81
5	13 700	211	2,2	752,86
6	15 400	207	1,8	602,08
Ruční kladení s dolisováním				
Zkušební těleso	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	ε při σ_{\max} [%]	W při σ_{\max} [Nmm]
1	9 750	158	1,8	414,05
2	10 100	172	1,9	499,89
3	9 770	176	2	523,19
4	9 440	141	1,6	325,2
5	9 500	177	2,3	637,12
6	9 750	178	2,3	653,15
Ruční kladení za mokra				
Zkušební těleso	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	ε při σ_{\max} [%]	W při σ_{\max} [Nmm]
1	15 000	234	2,3	943,96
2	15 000	234	2,5	1088,4
3	13 900	215	2	680,88
4	14 500	223	2,4	968,61
5	16 200	254	2,8	1365,73
6	17 800	294	2,4	1237,99