

Vliv použité technologie výroby na únavovou životnost kompozitů

Bc. Zbyněk Bártů

Diplomová práce
2019



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Zbyněk Bártů**

Osobní číslo: **T17280**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vliv použité technologie výroby na únavovou životnost kompozitů**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracování literární rešerše v dané oblasti**
- 2. Výroba zkušebních vzorků**
- 3. Provedení cyklických zkoušek**
- 4. Vyhodnocení výsledků z hlediska praktických aplikací**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. Černošek, J.: Úvod do problematiky kompozitních materiálů, VUT v Brně, Fakulta technologická, Zlín, 1992
2. EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
3. RŮŽIČKA, M., FIDRANSKÝ, J. :Pevnost a životnost letadel. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02254-4.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Milan Žaludek, Ph.D.
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

2. ledna 2019

Termín odevzdání diplomové práce:

17. května 2019

Ve Zlíně dne 13. května 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

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

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 obhajoby ¹⁾;
- 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. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ 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 § 60 ³⁾ 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

.....

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). Odpirá-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

Cílem diplomové práce je studium vlivu výrobních technologií ručního kladení, vakuové infuze a lisování prepregu na únavovou životnost kompozitních materiálů.

Teoretická část popisuje v úvodu problematiku kompozitních materiálů a použité materiály. Další část popisuje únavovou životnost kompozitů a charakteristické parametry únavové zkoušky. V závěru teoretické části jsou popsány výrobní metody kompozitních materiálů a charakteristika prepregu. Praktická část popisuje přípravu a postup výroby zkušebních těles, použité materiály, zkoušení zkušebních těles a v závěru vyhodnocení a porovnání statických a dynamických zkoušek.

Klíčová slova: vakuová infuze, ruční kladení, prepreg, únava kompozitních materiálů, dynamické zkoušky.

ABSTRACT

The aim of the master thesis is the study of the influence of manufacturing technologies of hand lay-up, vacuum infusion and prepreg pressing on fatigue life of composite materials.

The theoretical part describes the problems of composite materials and used materials in the introduction. The next section describes the fatigue life of composites and characteristic fatigue test parameters. Production methods of composite materials and description of prepreg are described at the end of the theoretical part. The practical part describes the preparation and process of production of test specimens, used materials, testing of test specimens and at the end the evaluation and comparison of static and dynamic tests.

Keywords: vacuum infusion, hand lay-up, prepreg, fatigue of composite materials, dynamic tests.

Velmi rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Milanu Žaludkovi Ph.D. za odborné vedení, ochotu a vynaložený čas, který mi věnoval po celou dobu tvorby mé diplomové práce. Na závěr bych také chtěl poděkovat rodině, kamarádům a spolužákům za veškerou pomoc a podporu při studiích na vysoké škole.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	12
1.1 VÝZTUŽ A MATRICE	12
1.2 FORMA VÝZTUŽÍ.....	13
1.2.1 Tkaniny	14
1.2.2 Skleněná vlákna	14
1.2.3 Uhlíková vlákna	16
1.2.4 Aramidová vlákna	17
1.3 DRUHY MATRIC	17
1.3.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)	18
1.3.2 Vinylesterové pryskyřice (VE-R)	18
1.3.3 Epoxidové pryskyřice (EP-R)	18
1.3.4 Fenolické pryskyřice (PF-R).....	18
2 ÚNAVA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	19
2.1 ÚNAVOVÉ POŠKOZENÍ U KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	19
2.2 ÚNAVOVÁ ZKOUŠKA	22
2.2.1 Zkušební frekvence a zatížení.....	23
2.2.2 S-N diagramy neboli Wöhlerova křivka	23
2.2.3 Normalizované metody únavových zkoušek	25
3 VÝROBA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	26
3.1.1 Ruční kladení	26
3.1.2 Metoda vakuového vaku	27
3.1.3 Vakuová infuze	28
4 PREPREGY	30
4.1 VLASTNOSTI A ROZDĚLENÍ PREPREGŮ	30
4.2 VÝROBA PREPREGU	31
4.2.1 Rozpouštědlový způsob výroby	33
4.2.2 Výroba pomocí horké taveniny	34
4.2.3 Výroba pomocí chemického B-stavu	35
II PRAKTICKÁ ČÁST	36
5 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	37
5.1 PŘÍPRAVA FORMY, TKANINY A MATRICE	37
5.2 RUČNÍ KLADENÍ.....	39
5.3 VAKUOVÁ INFUZE	39
5.4 LISOVÁNÍ PREPREGU	42
5.5 ŘEZÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	43
5.5.1 Zkušební tělesa vyrobené metodou ručního kladení se skleněnými vlákny	43

5.5.2	Zkušební tělesa vyrobené metodou ručního kladení se uhlíkovými vlákny	44
5.5.3	Zkušební tělesa vyrobené vakuovou infuzí	45
5.5.4	Zkušební tělesa vyrobené z prepregu	45
5.6	VYTVRZOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES V PECI	46
5.7	MATERIÁLY POUŽITÉ PRO VÝROBU	47
6	STATICÁ ZKOUŠKA	48
6.1	ZKUBŠENÍ STROJ	48
6.2	NAMĚŘENÉ HODNOTY TAHOVÉ ZKOUŠKY	50
6.2.1	Ruční kladení - skleněné vlákno	50
6.2.2	Ruční kladení – uhlíková vlákna	52
6.2.3	Deltapreg VV430u	54
6.2.4	Vakuová infuze – skleněná vlákna	55
6.3	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ NEMĚŘENÝCH DAT	56
7	DYNAMICKÉ ÚNAVOVÉ ZKOUŠKY	58
7.1	NASTAVUJÍCÍ PARAMETRY ZKOUŠKY	58
7.2	ZKUŠEBNÍ TĚLESA Z UHLÍKOVÉ TKANINY	60
7.2.1	Porovnání hodnot zkušebních těles uhlíkových vláken	64
7.3	ZKUŠEBNÍ TĚLESA ZE SKLENĚNÝCH VLÁKEN	64
7.3.1	Porovnání vzorků skleněných vláken	69
7.4	ZKUŠEBNÍ VZORKY VYROBENÉ VAKUOVOU INFUZÍ	70
7.5	ZKUŠEBNÍ TĚLESA DELTAPREG VV340U	72
8	VYHODNOCENÍ A POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT	75
8.1	SKELNÁ TKANINA	75
8.2	LISOVÁNÍ PREPREGU A RUČNÍ LAMINACE UHLÍKOVÉ TKANINY	76
	ZÁVĚR	78
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	80
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	82
	SEZNAM OBRÁZKŮ	83
	SEZNAM TABULEK	86
	SEZNAM PŘÍLOH	87

ÚVOD

V dnešní době nás všude okolo obklopují kompozitní materiály, které jsou velmi hojně využívány v průmyslovém odvětví. Bez kompozitních materiálů si dnešní průmyslový svět nedovedeme ani představit. Kompozity se vyskytují téměř ve všech průmyslových oblastech, jako je letecký, automobilový, vojenský a stavebnický průmysl, dále taky v medicíně, ale také při výrobě sportovních náradí.

Kompozitní materiály na bázi uhlíkového a skleněného vlákna jsou stále více používány pro různá konstrukční řešení. Uhlíkové vlákna jsou jedny z nejdražších vyztužujících materiálů, díky svým jedinečným mechanickým vlastnostem. Naopak skleněná vlákna jsou jedny z nejlevnějších a nejpoužívanějších vyztužujících materiálů. V dnešní době má stále větší zastoupení využití prepregu při výrobě kompozitních materiálů. Výhoda prepregu spočívá v tom, že je oddělen proces prosycování výztuže s pojivem od dalšího zpracování. Kompozity vyrobené z prepregu mají skvělé mechanické vlastnosti, nízkou hmotnost, ale mají vyšší výrobní cenu.

Výsledné mechanické vlastnosti výrobku jsou ovlivněny nejen druhem matrice a výztuže, ale také vlivem použité výrobní technologie. Každá výrobní technologie vykazuje svou požadavky na zručnost pracovníka a svou technologickou náročnost. Praktická část této diplomové práce se bude zabývat porovnáním tří druhů výrobních technologií kompozitních materiálů v jejich závislosti na únavové životnosti kompozitů. Praktická část se skládá z výroby zkušebních těles u jednotlivých výrobních metod, testování ze statických a dynamických zkoušek. Výsledky zkoušek jsou porovnávány mezi jednotlivými technologiemi. Cílem diplomové práce je posouzení vlivu výrobních technologií na únavovou životnost kompozitních materiálů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

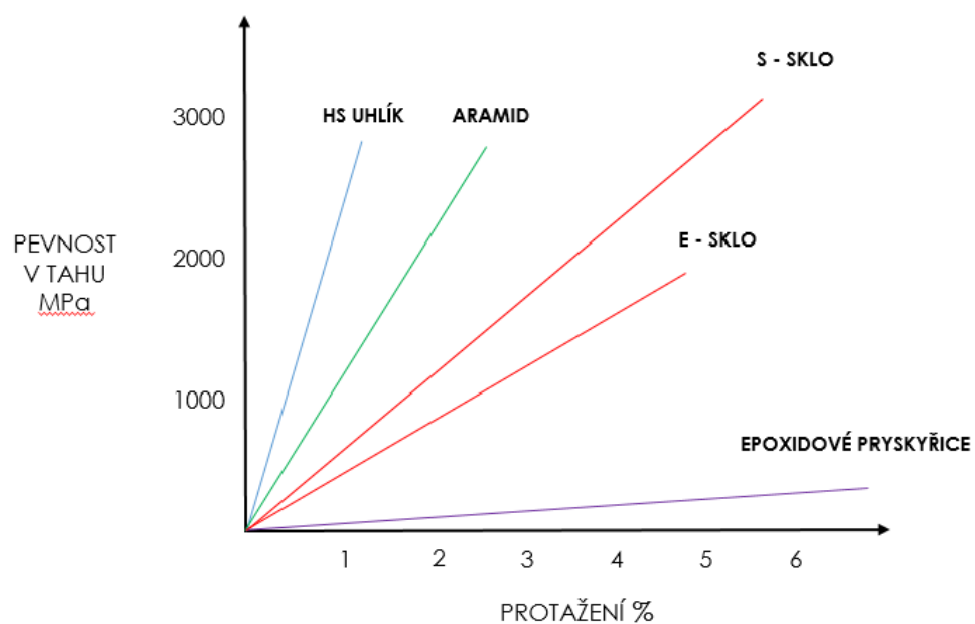
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Jako kompozity se označují materiály, které jsou složeny ze dvou nebo více složek, které se výrazně liší fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Spojením těchto složek vznikne zcela nový materiál s unikátními vlastnostmi, které nemohou být dosaženy kteroukoli složkou samostatně, ani prostou sumací. Jednou složkou jsou vyztužující vlákna (diskontinuální fáze), která dodávají pevnost, tuhost a zabraňují vzniku a růstu trhlin ve struktuře. Druhou složkou jsou pojiva (matrice), spojitá fáze, která udržuje vyztužující vlákna v požadované poloze. Zajišťují přenos sil mezi všemi vyztužnými vlákny, dodává materiálu potřebné fyzikální a chemické vlastnosti. [1,3]

1.1 Výztuž a matrice

Výztuž je hlavním určujícím prvkem mechanických vlastností, například pevnost a tuhost, přenáší také tahové napětí. Významný podíl na vlastnostech má také uspořádání jednotlivých vláken. Hlavním řídicím parametrem technologických a strukturních vlastností kompozitu je obsah vláken. Nejčastěji používanou výztuží jsou skleněná vlákna.

Matrice je spojitou složkou kompozitu, slouží jako pojivo, ochranná složka vyztužujících vláken, zaručení geometrického tvaru a přenosu sil. [1,2]



Obrázek 1 Graf vlastností složek kompozitů [4]

1.2 Forma výztuží

Vyztužující vlákna sama o sobě nemají téměř žádné využití jako konstrukční prvky. Ve spojení s matricí, jako kompozitní materiál nabízí široké uplatnění. Mají vyztužující účinek, zvyšují pevnost a tuhost.

Musí být splněny následující podmínky:

- vyztužující vlákna musí mít vyšší tuhost než matrice,
- vyztužující vlákna musí být pevnější než matrice,
- matrice se nesmí porušit dřív než vyztužující vlákna.

Jako vyztužující vlákna se nejčastěji používají skleněná vlákna, uhlíková vlákna a aramidová vlákna. Porovnání jejich vlastností se nachází v tab. 1.

Tabulka 1 Porovnání hustoty a mechanických vlastností vláken [1]

Vlastnosti vybraných vláken			
Druh vlákna	Hustota g/cm ³	Mez pevnosti v tahu MPa	E modul pružnosti MPa
skleněná typ E	2,6	3400	73000
skleněná typ S	2,53	4400	86000
skleněná typ C	2,52	2400	70000
aramidová	1,45	3400 - 3800	80000 – 186000
uhlíková	1,6-2	1500 - 3500	180000 - 500000

Pomocí textilního zpracování, výroby povrchových rohoží, vyztužování reaktoplastů a termoplastů, se většina vyztužujících vláken upravuje na jednotlivé výrobní produkty. [1,2]

Vybrané formy výztuží

- tkaniny
- příze, skané příze (nitě)
- pramence (rovningu)
- rohože (ze skaného pramence, z kontinuálních vláken)
- povrchové rohože

1.2.1 Tkaniny

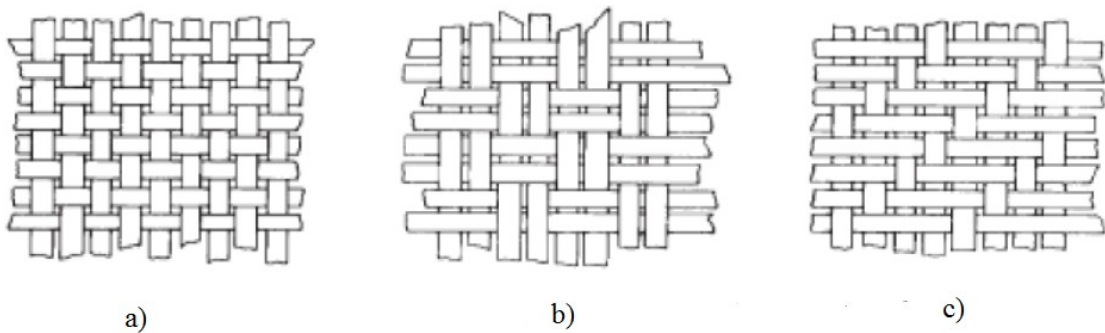
Jedná se o plošné výrobky z vláken nebo pramenců uložených pravoúhle k útku a osnově. Rozdílnému typu křížení vláken v osnově se říká vazba. Druhy vazeb jsou na obr. 2.

Druhy tkaninových vazeb.

Plátnová vazba: jedná se o základní jednoduchou vazbu, která se lehce zpracovává, je stálá a má malé otřepty při řezání.

Atlasová (saténová) vazba: vhodná pro tvarové prvky, má velmi malé vychýlení vláken. Dosažení hladkého povrchu.

Keprová vazba: vhodná pro tvarové výrobky, je ohebnější, má větší tuhost a pevnost. [1,2]



a) Plátnová vazba, b) Keprová vazba, c) Atlasová vazba

Obrázek 2 Druhy tkaninových vazeb [2]

1.2.2 Skleněná vlákna

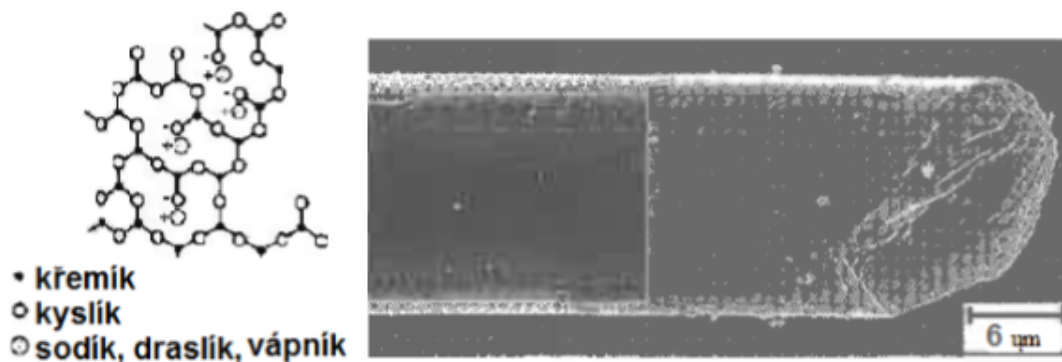
Skleněná vlákna („glass fiber“), jsou vlákna s pravidelným kruhovým průřezem o průměru nejčastěji od 3,5 do 24 μm . Nejpoužívanější skleněná vlákna jsou vyráběny ze skloviny, která je označována jako E sklo. Vyrábí se tažením z roztavené skloviny.

Skleněná vlákna zlepšují odolnost proti stárnutí, nehořlavosti, odolnost proti povětrnostním vlivům, chemickým vlivům a pružnost. Skleněná vlákna jsou izotropní na základě své amorfní struktury a proto mají stejné materiálové vlastnosti jak v příčném tak i podélné směru. Aramidová a uhlíková vlákna tuto vlastnost nemají. Silná kovalentní vazba mezi křemíkem a kyslíkem způsobuje vysoké hodnoty pevnosti a modulu pružnosti. Modul pružnosti se téměř rovná modulu pružnosti hliníku a u oceli se rovná 1/3 modulu pružnosti. Skleněná vlákna mají vysokou mez pevnosti, jejich deformace je téměř elastická. Mají

lepší tepelnou odolnost než ostatní vlákna, jsou schopné dlouhodobě odolávat působení teplot až 250°C bez výrazného poklesu mechanických vlastností. Jsou nehořlavá a ohnivzdorná. Konečné vlastnosti jsou ovlivněny druhem, orientací a obsahem skleněných vláken. [1,2,5]

Tabulka 2 Složení skloviny a její vlastnosti [2]

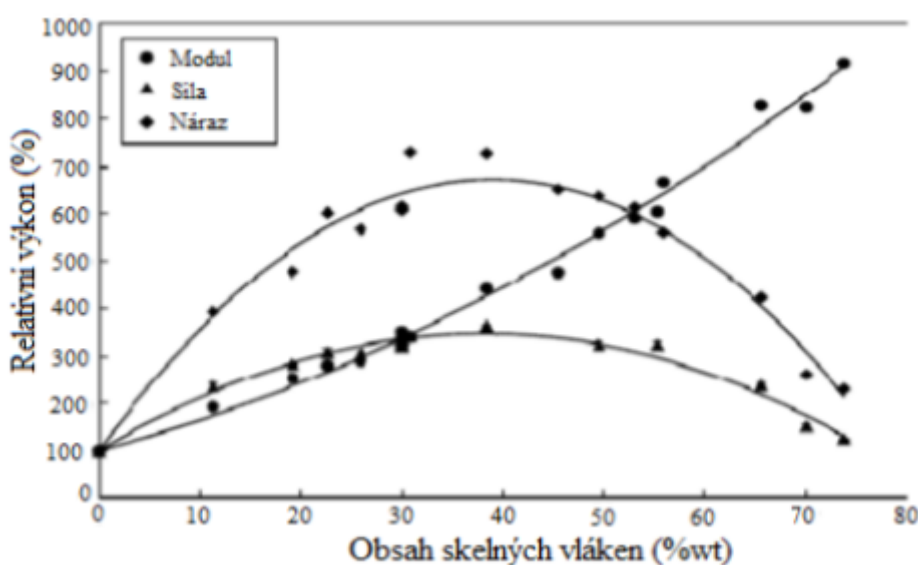
Sklovina	E	R	C
Složení %			
SiO ₂	54	60	60 - 65
Al ₂ O ₃	14 - 15	25	2 - 6
CaO	-	14	14
MgO	20 - 24	3	1 - 3
B ₂ O ₃	6 - 9	< 1	2 - 7
K ₂ O	< 1	< 1	8
Vlastnosti			
Hustota (g.cm ⁻³)	2,6	2,53	2,52
Mez pevnosti v tahu (N.mm ⁻²)	3400	4400	2400
Modul pružnosti (N.mm ⁻²)	73000	86000	70000
Poměrné prodloužení při přetržení %	< 4,8	< 4,6	< 4,8
Součinitel teplotní roztažnosti (K ⁻¹)	5,0. 10 ⁻⁶	4,0. 10 ⁻⁶	6,3. 10 ⁻⁶
Teplotní měknutí (C°)	850	980	750



Obrázek 3 Struktura skleněného vlákna [1]

Skleněná vlákna se vyrábí tažením z trysek. Při teplotě 1400°C se nejprve taví vápenec, křemičitý písek, kaolín, dolomit, kyseliny boritá a kazivec na E-sklovinu. V tekutém stavu se vede kanály k spřádacím tryskám (jejich počet je 200 – 4000). Ze spřádacích trysek, které jsou zahřáté na vhodnou teplotu, sklovina pomalu vytéká a rychle tuhne. Pomocí dloužení na rychle rotujícím navíjecím zařízení, se vlákna kalibrují na daný průměr.

U vlivu obsahu skleněných vláken na výsledné chování neplatí přímá úměra. Která by znamenala čím více, tím lépe. Obsah vláken je volen podle požadovaných vlastností a budoucího použití kompozitu. Vliv obsahu je znázorněn na obr. 4.



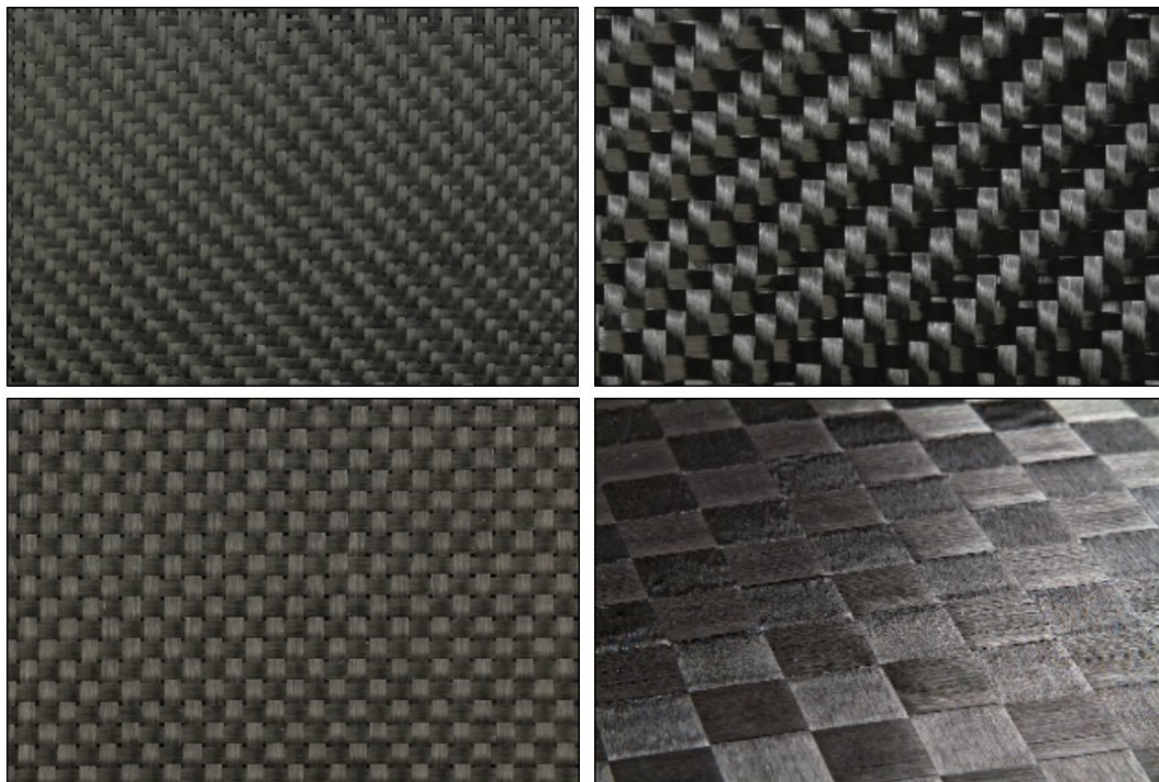
Obrázek 4 Vliv skleněných vláken na vlastnosti kompozitu [1]

Kompozitní materiály ze skleněných vláken mají využití v mnoha průmyslových odvětvích. Například v automobilovém průmyslu, leteckém průmyslu, chemickém průmyslu a ve stavebnictví.

1.2.3 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna v angličtině označována jako „Carbon Fiber“ jsou vlákna s vysokou tuhostí, pevností, ale nízkou tažností a měrnou hmotností. Složení uhlíkových vláken obsahuje více než 90% uhlíku, < 7% dusíku, < 1% kyslíku, < 0,3% vodíku. Mají průměr 5 – 10 μm . Pro výrobu uhlíkových vláken se používají tři materiály. Ty jsou nejprve karbonizovány. Při karbonizaci se odštěpí téměř všechny prvky až na uhlík. Poté se stoupající teplotou zvyšující se grafitizací až do 1800°C se zlepšují mechanické vlastnosti.

- celulóza - vlákna vyrobená z celulózy mají méně dokonalou strukturu
- polyakrylonitril - vyrobená vlákna jsou považována za standardní vlákna
- smola – způsob výroby vláken, kompenzuje nízká cena výchozí suroviny. Vlákna mají dobré tepelné a elektrické vlastnosti, a také mají vysokou hodnotu E-modulu. Jelikož mají nižší pevnost v tlaku než ostatní běžná vlákna, mají na trhu menší podíl. [1,2,5]



Obrázek 5 Uhlíkové tkaniny [5]

1.2.4 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna (AF- Aramid fiber) jsou založena na bázi lineární organických polymerů, Jejich kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna. Předností aramidových vláken je jejich vysoká pevnost a tuhost. [1,2]

1.3 Druhy matric

Matrice je materiál, kterým se prosycuje systém vláken. Hlavními úkoly matrice jsou přenos namáhání vlákna, zaručení geometrického tvaru, ochrana vlákna před vlivy okolí a převedení namáhání z vlákna na vlákno. Matrice mohou být kovové, keramické a poly-

merní. Polymerní matrice jsou nejčastěji využívány. Dělíme je na termosety a termoplastické (které nejsou tak hojně využívány). [1,2,6]

1.3.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)

Bezbarvá až slabě nažloutlá reaktivní pryskyřice. Vytvrzuje se za běžných nebo zvýšených teplot. Vlivem uvolněného reaktivního tepla dochází k smršťování o 5-9%. Up-R je díky nízké viskozitě, dobrému smáčení vláken, vysoké rychlosti vytvrzování a nízké ceně velmi často používán pro výrobu kompozitních materiálů.

1.3.2 Vinylesterové pryskyřice (VE-R)

Jsou reaktivnější než UP-R. Mají nižší viskozitu, odolávají vyšším teplotám, jsou houževnatější a chemicky odolné. Díky těmto vlastnostem se využívají v prostředí s vysokým korozním namáháním, (velkorozměrové trouby, pračky, chladicí věže, tepelné regenerátory, přepravní nádrže a další). Velké využití mají v čistírnách odpadních vod.

1.3.3 Epoxidové pryskyřice (EP-R)

EP-R jsou za normální teploty kapalné až pevné látky, které mohou obsahovat případné pomocné látky, např. rozpouštědla. S tvrdidlem se musí mísit v přesném stechiometrickém poměru. Široká paleta tvrdidel ovlivňuje vlastnosti vytvrzených pryskyřic. Různou volbou pryskyřic a tvrdidel lze dosáhnout mnoha rozdílných vlastností pojiva. Používá se v elektrotechnice díky dobrým izolačním vlastnostem, letectví, kosmonautice, sportovních potřebách a také se používá při výrobě listů větrných elektráren. Díky dobrým mechanickým vlastnostem zejména dynamickému namáhání, jsou vhodné pro vysoko pevnostní uhlíkové vlákna.

1.3.4 Fenolické pryskyřice (PF-R)

Podíl na celkové výrobě kompozitů je nízký. Jejich zpracování je ztíženo použitím kyselin a odštěpováním těkavých látek. Jejich výhodou je vysoká tepelná, chemická odolnost a tvarová stálost, také vykazují dobré chování při požáru, nízká hořlavost a malá toxicita kouře.

2 ÚNAVA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Mezním stavem únavy materiálu rozumíme stav, kdy dojde vlivem časově proměnných zatížení k porušení funkční způsobilosti součásti. Je to proces únavy materiálu, při kterém se mění vlastnosti a strukturní stavy způsobené kmitavým (cyklickým) zatěžováním. Procesem únavy rozumíme hromadění poškození při opakovaném kmitavém, tepelném nebo mechanicko-tepelném namáhání. Po určité době může dojít k únavovému lomu, i za případu, že zatěžovací napětí je nižší, než je mez kluzu a mez pevnosti. Únava materiálu negativně ovlivňuje trvanlivost konstrukce a může vést mnohdy až k havárii.

Dlouhými vlákny vyztužené kompozitní materiály umožňují optimalizaci jejich struktury s ohledem na předpokládaný způsob namáhání, avšak vlivem jejich mikroskopické i makroskopické heterogenní struktury vzniká značná rozmanitost ve způsobu a průběhu poškození. [7,8]

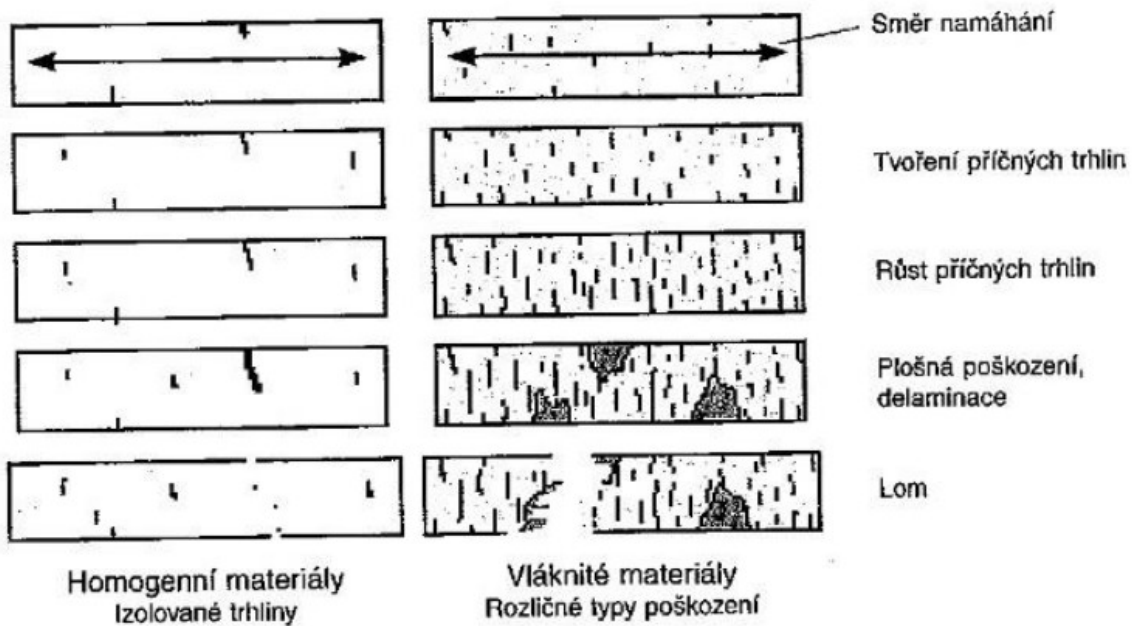
2.1 Únavové poškození u kompozitních materiálů

Únavu můžeme dělit podle typu namáhání, na statickou a dynamickou. Dlouhodobým konstantním zatížením materiálu vzniká statická únava. Projevuje se poklesem pevnosti. Pomalý růst mikrotrhlin je příčinou tohoto procesu. Statická únava má význam zejména u křehkých materiálů, jako jsou sklo a keramika. Při proměnlivém zatížení nastává dynamická únava, která probíhá u všech materiálů. Proměnlivé namáhání může být buď cyklické, nebo náhodné.

Čtyři hlavní faktory ovlivňující únavovou pevnost:

- materiál a jeho pevnostní, cyklické a lomové vlastnosti
- tvar součásti a koncentrace napětí
- technologie výroby a provozní podmínky
- provozní zatížení.

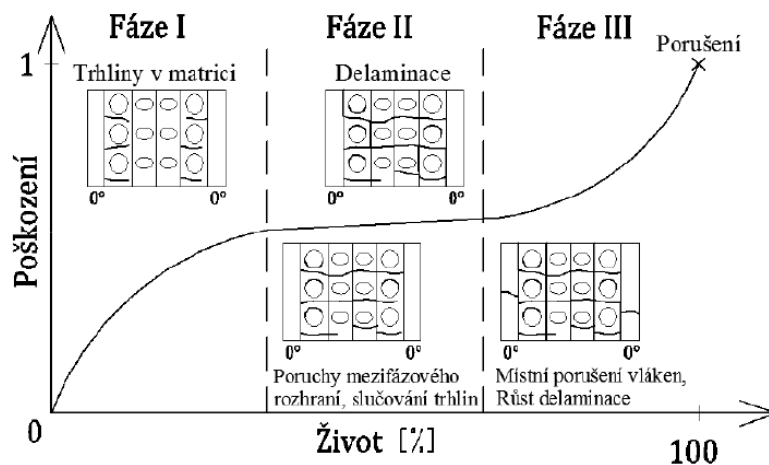
Při cyklickém namáhání kovových materiálů se vytváří lokálně působící trhlinka, zatímco u vláknů vyztužených kompozitů, při dynamickém namáhání je poškození provázáno vznikem a rozvojem různých typů poruch. Prvním krokem je oddělení vlákna od matrice (ztráta adheze). Vytvoření trhlin způsobují velké kontrakce přetvoření a vysoké napětí v místě styku vlákna a matrice. Šíření trhlin se vyskytuje obvykle mezi vlákny. U kompozitních materiálů může růst trhliny zastavit sousedící pevnější složka materiálu.



Obrázek 6 Průběh poškozování homogenních a vláknitých materiálů [1]

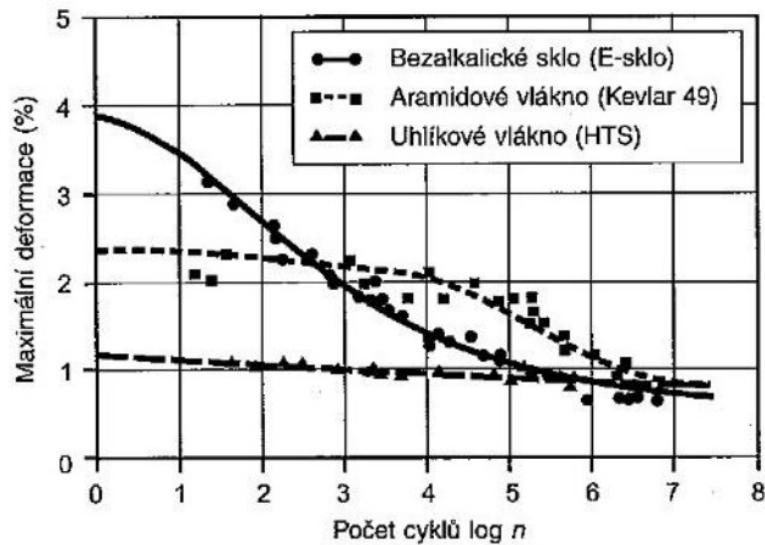
U vlákniny poškozených kompozitů se typy poškození dělí do těchto skupin:

- Porušení soudržnosti vlákna s matricí
- Trhlina v matrici
- Lom vlákna
- Porušení soudržnosti mezi jednotlivými vrstvami (delaminace)



Obrázek 7 Poškození během života kompozitního zkoušeného tělesa [1]

Na vlastnostech jednotlivých složek kompozitu (tažnosti matrice, typu a obsahu vláken atd.) závisí časové pořadí a rozsah typů poškozování. Závisí také na směru a druhu působícího napětí (tah, tlak, smyk).



Obrázek 8 Únavové vlastnosti kompozitu s epoxidovou pryskyřicí a různými druhy vláken [1]

Poruchy únavového poškození dělíme na mikroskopické (velikost jednoho nebo několika průměrů vláken) a makroskopické (o velikosti nejméně jedné tloušťky vrstvy). Proces porušování vzniká na mikroskopické úrovni a se stále se zvětšujícím počtem zatěžovacích cyklů vznikají stále rostoucí třidimenzionální poškození. Toto poškození se projeví jako snížení tuhosti materiálu. Pokud v určitém místě dosáhne rozsah poškození kritické hodnoty, klesne zbytková tuhost a pevnost pod úroveň působícího namáhání a dojde k lomu nebo ke ztrátě stability.

Únavové vlastnosti u vlákně vyztužených polymerů závisí na použitých výchozích materiálech. Jako příklad může být že, epoxidové pryskyřice vykazují lepší únavové vlastnosti než polyesterové. Větší vliv má volba vláken, uhlíková vlákna jsou mnohem odolnější při dynamickém zatížení než aramidová a skleněná. [1,7,8,9]

K popsání únavového chování slouží tato kritéria:

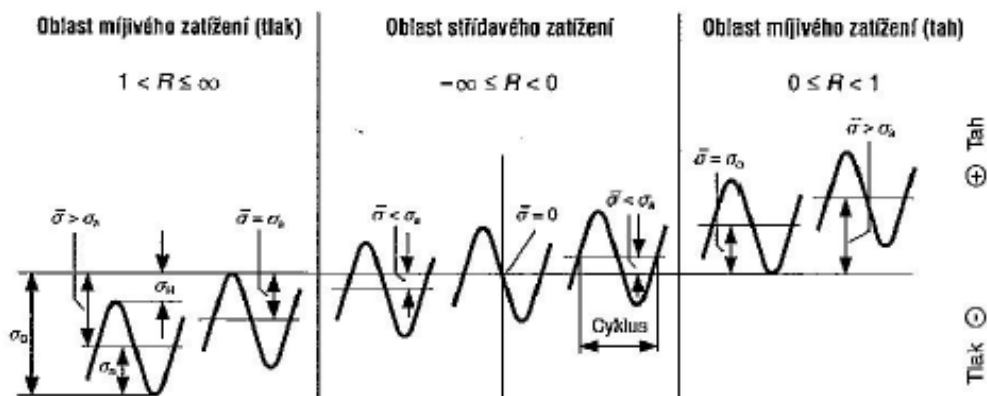
- Lom nebo úplná porucha (Wöhlerova křivka)
- Pokles tuhosti a zbytková pevnost
- Způsob poškození

2.2 Únavová zkouška

Metody vyšetřování dynamických vlastností můžeme dělit na:

- Kontinuální -proces poškozování je průběžně zaznamenáván
- Diskontinuální – zkušební vzorek je zatěžován až do lomu nebo do dosažení určitého počtu zatěžovacích cyklů a poté je vyšetřován mikroskopickou nebo jinou ne-destruktivní zkouškou

Dynamické zkoušky se provádějí za různých úrovní a typech namáhání. Kompozity se chovají různě při tahovém a tlakovém namáhání. Při tlakovém namáhání má větší význam matrice, při tahovém namáhání mají větší vliv na únavové chování vyztužující vlákna. Pro cyklická zatěžování se jako charakteristika úrovně namáhání používá poměr dolního a horního napětí (R). Pokud je dolní napětí tlakové, tak má záporné znaménko a horní napětí tahové, pak je hodnota R záporná.



Obrázek 9 Oblasti cyklického zatěžování [10]

Největší amplitudou σ_D je dána únavová pevnost, kterou dokáže zkušební těleso absorbovat po určitý počet cyklů, po překročení únavové pevnosti dojde k lomu. Únavová zkouška probíhá

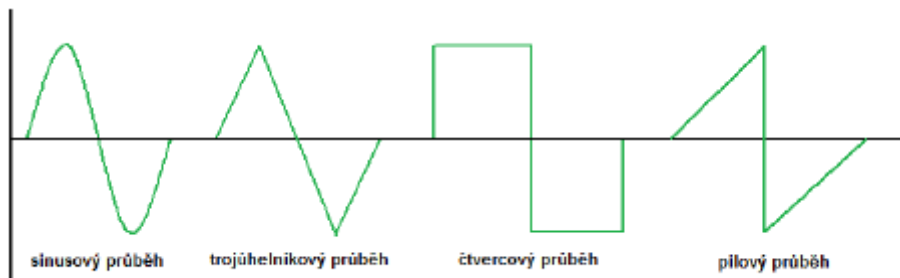
Únavová zkouška může probíhat při různých typech zatížení, při konstantním zatížení dochází k porušení materiálu po několika cyklech, i přes konstantní zatížení, s rostoucím počtem cyklů se zvětšuje deformace v důsledku nahromaděných poruch. V případě konstantního průhybu nebo deformace dochází k plynulejšímu nárůstu poruch. Nemusí dojít k destruktivnímu porušení vzorku během zkoušky, kvůli tomu musí být stanovena i jiná

kritéria, za kterých lze považovat zkoušku za hotovou (délka trhlin, pokles tuhosti). [7,8,10]

2.2.1 Zkušební frekvence a zatížení

Na únavovou životnost má značný vliv zkušební frekvence zatěžování (značí se písmenem f a jednotkou je Hertz (Hz) nebo počet cyklů za sekundu). Používá se frekvence od 1-5 Hz u vyztužených termoplastů a u vyztužených reaktoplastů 5-10 Hz. Za použití vyšších frekvencí by mohlo docházet k ohřevu materiálu. Zkoušky probíhají za konstantní teploty.

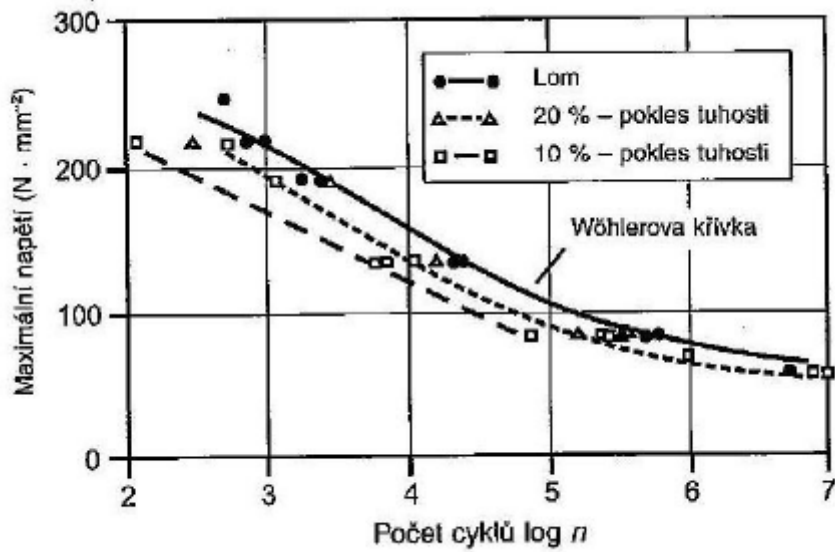
Nejpoužívanější průběh zatěžovací křivky je sinusový průběh a to z důvodu že, je dobře definovatelný na stroji a také nejvíce odpovídá reálnému zatěžování. Další průběhy mohou být trojúhelníkové čtvercové a pilové. [7,8,13]



Obrázek 10 Průběhy zatěžovací křivky [13]

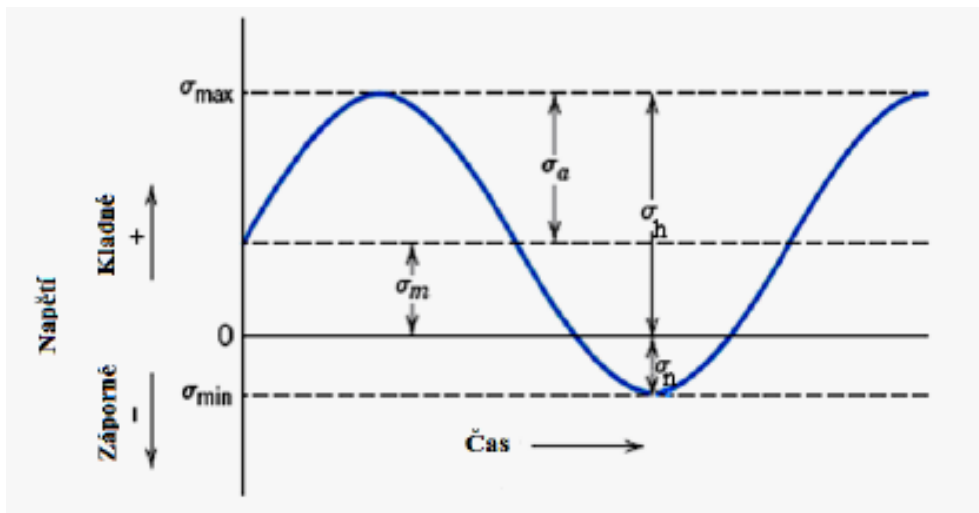
2.2.2 S-N diagramy neboli Wöhlerova křivka

Pro kompozity vyztužené vlákny se používá nejčastěji k popisu únavového chování. Kritériem únavy je lom. Avšak pro dynamicky zatížené části je lom jako jediné kritérium únavy nedostatečný, jelikož většina plastů vyztužených vlákny vykazuje pokles tuhosti s rostoucí dobou zatížení a postupující únavou. U vlákny vyztužených polymerů pro konstrukční prvky je tento pokles přípustný, kde se může změna vlastností měnit s počtem cyklů v určitých mezích. Jako kritérium únavy vezmeme určitý pokles tuhosti (10- 20 %) a vynešeme-li tyto body do Wöhlerova diagramu, získáme informace o časovém průběhu únavy (obr. 11). [1,7,8,11]



Obrázek 11 Pokles tuhosti jako kritérium únavy (epoxidová pryskyřice vyztužená uhlíkovými vlákny) [1]

Popis cyklu Wöhlerovi křivky



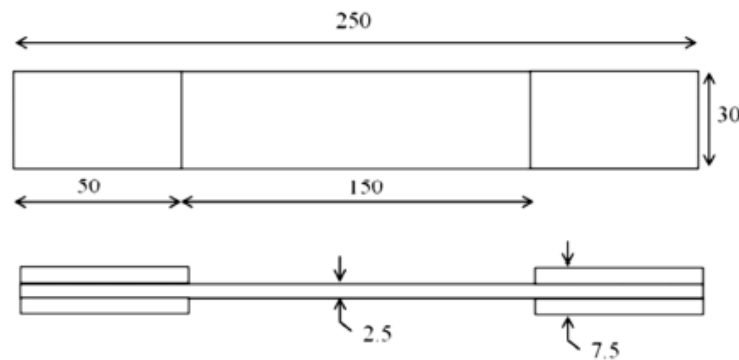
Obrázek 12 Charakteristika opakovaného cyklu zatížení [11]

- σ_h – horní napětí
- σ_a – amplituda napětí
- σ_n – dolní napětí
- σ_m – střední napětí

2.2.3 Normalizované metody únavových zkoušek

EN ISO 13003 - "Fibre Reinforced Plastics Composites - Determination of Fatigue Under Cyclic Loading Conditions" Polymerní kompozitní materiály vyztužené vlákny - stanovení únavového chování za podmínky cyklického zatížení.

Tato norma definuje postupy pro zkoušení únavy kompozitních materiálů, za podmínek cyklického zatížení, konstantní frekvence a amplitudy. Norma uvádí zásady pro únavové zkoušky pro všechny způsoby testování a řízení testovacích strojů.



Obrázek 13 Zkušební těleso zkoušky EN ISO 13003 [12]

ASTM D3479 -" Standard test method for tension-tension fatigue of polymer matrix composite materials" Normalizovaná metoda únavového chování pro tah-tah, kompozitních materiálů s polymerní maticí.

Podobná normě ISO, je založená na podobné statické zkoušce, ale je omezena jen na režim v tahu. Dělí se na dvě metody A a B, podle toho zde je řídicí parametr zatížení či deformace. [12]

3 VÝROBA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

3.1.1 Ruční kladení

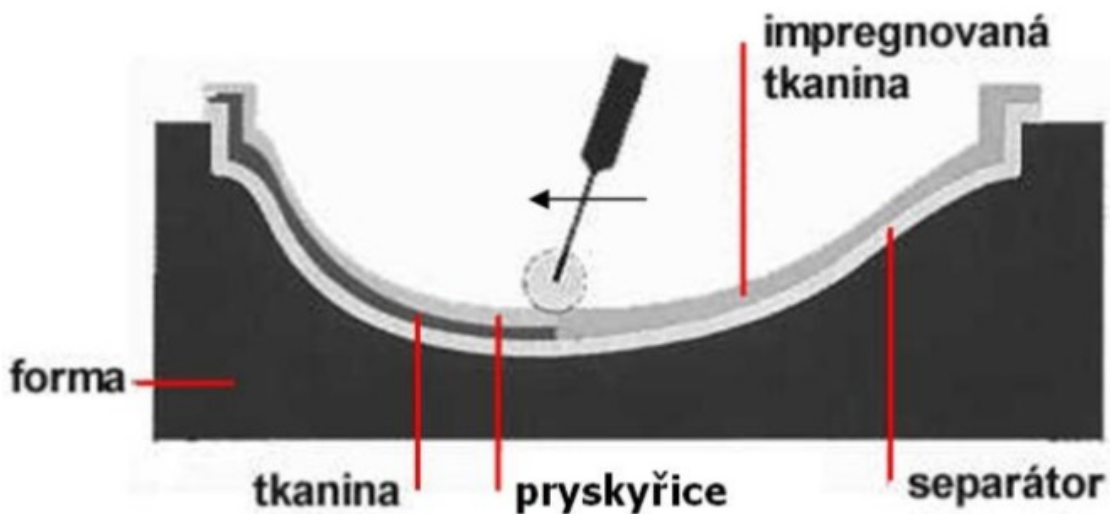
Je to jedna z nejstarších metod výroby kompozitních materiálů. Tato metoda se může také nazývat kontaktní lisování. Je to proces, ve kterém je pryskyřice i výztuž nanášena ručně na vhodný povrch, buď pozitivní, nebo negativní formy. Kvalita povrchu kompozitního dílce je ovlivněna tím, na kterou stranu jsou jednotlivé komponenty kladeny. Pouze jedna strana výsledného výrobku má kvalitní povrch.

Postup výroby:

- povrchová úprava formy separačním činidlem
- „gel coat“ pokud je třeba
- nanesení pryskyřice
- položení výztuže
- další vrstva pryskyřice je vtlačena válečkem do výztuže a je přitom vytlačen přebytek vzduchu tvořící bubliny, poté dojde na položení další vrstvy výztuže
- tyto dva kroky jsou opakovány tak dlouho, dokud je vytvořena požadovaná tloušťka stěny
- vytvrzení vyráběného výrobku
- vyjmutí z formy.

Hlavní výhodou ručního kladení, je jednoduchost technologie, další výhody jsou nízké náklady, flexibilita konstrukce, možnost jednoduše aplikovat „gel coat“ a také jednoduché dokončovací operace.

Mezi nevýhody patří nereprodukovatelnost odpadu a jeho velké množství, které lze jen obtížně zpracovávat. Další nevýhody jsou náročnost na lidskou práci a závislost povrchu na zkušenosti pracovníka, pouze jeden kvalitní povrch, malá produktivita. Touto metodou se vyráběly lodě, skladovací nádrže, rovné plochy bazénů a různé prototypy. [2,15,16]



Obrázek 14 Schéma výrobní metody ruční kladení [14]

3.1.2 Metoda vakuového vaku

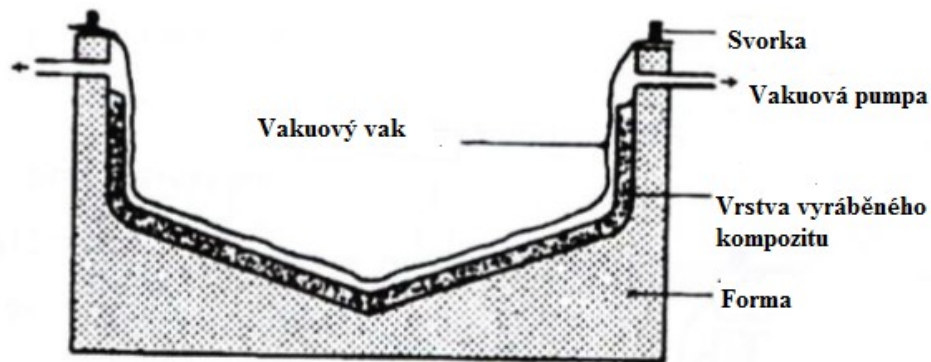
Jedná se o zlepšení metody ručního kladení v poslední fázi výrobního procesu při vytvrzování. Na povrch vyráběného kompozitu se položí tenký film nepropouštějící vzduch. Po evakuování formy, pomocí tlaku filmu dojde k vytlačení přebytečných bublin.

Postup výroby:

- ruční naklazení laminátu
- folie je položena přes volný povrch kompozitního dílce
- prostor formy je evakuován
- ručně je film dotlačen na kompozit a všechen přebytečný vzduch je vytlačen ven
- vytvrzení
- film je stržen z laminátu a výrobek je dokončen

Výhoda je, že je možno připravit materiály s minimálním obsahem vzduchových bublin. Je vhodný na sendvičové struktury.

Nevýhodou je velký obsah odpadu. Pracovní síla musí být velmi zručná, neboť výrobní proces je náročný a také velmi pomalý. Není možno zarovnat okraje před vytvrzením. [1,2]



Obrázek 15 Schéma metody odsávání vzduchu pomocí vakuového vaku [2]

3.1.3 Vakuová infuze

Vakuová infuze (VIP – vacuum infusion proces), je proces který využívá atmosférického tlaku a vakua. Suché materiály tvořící sendvičovou konstrukci jsou postupně kladeny do formy, poté jsou kladeny pomocné materiály jako odtrhová a rozváděcí tkanina, vakuová folie a těsnění. Všechny tyto vrstvy jsou slisovány pomocí vakuové folie. Pomocí rozváděcí tkaniny a vakua je do formy přiváděna pryskyřice. Vytvrzování probíhá za pokojové teploty. Hlavní využití této metody je tam, kde ostatní metody byly příliš pracné nebo nákladné. Je používána při výrobě paluby lodí, dílců pro kapotáž lokomotiv a vagonů, lopatek větrných elektráren, komponentů letadel, sportovních a závodních automobilů. [2]

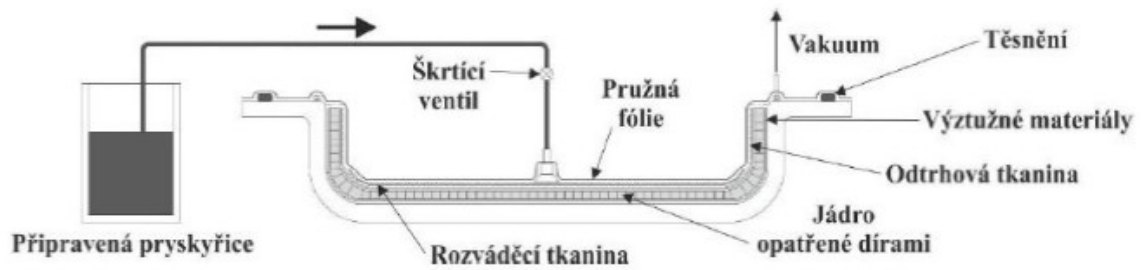
Výhody výroby vakuové infuze:

- nízká hmotnost, vhodné pro velkorozměrné výrobky
- směrově orientované vlastnosti
- výborné mechanické vlastnosti (vysoká pevnost a tuhost)
- tepelná a chemická odolnost
- elektrická a tepelná vodivost.

Nevýhody výroby vakuové infuze:

- vysoké náklady
- obtížná recyklace

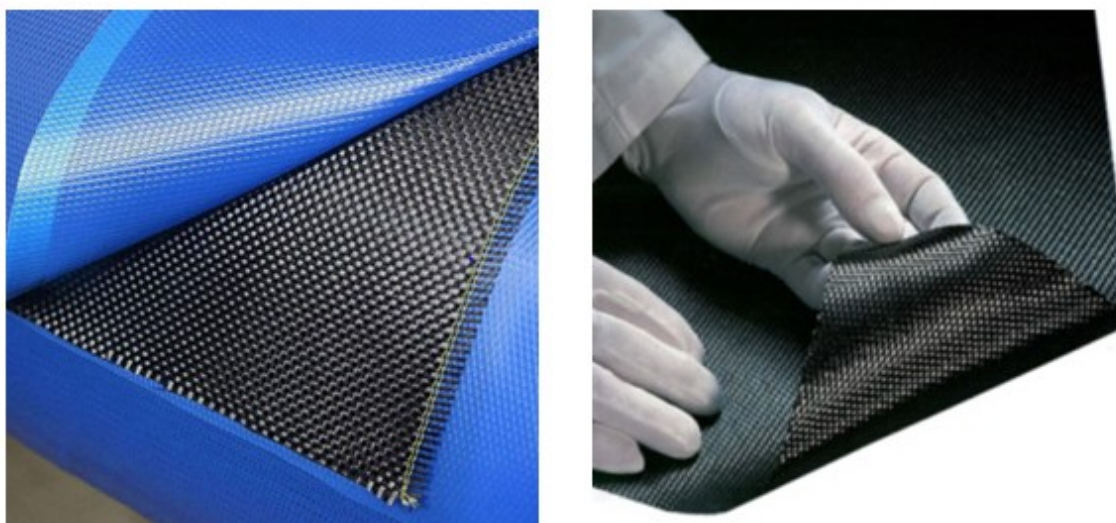
- náročnost na zkušenost pracovní obsluhy
- náročnost na opravy.



Obrázek 16 Metoda vakuové infuze [17]

4 PREPREGY

Prepregy jsou předimpregnovaná vlákna, která se často používají pro výrobu kompozitních materiálů. Název prepreg vznikl z anglického slova preimpregnated fibres „předimpregnovaná vlákna“. Jsou to polotovary určené k výrobě vláknových kompozitů. Hlavní složkou je předimpregnovaná výztuž napuštěná částečně vytvrzenými pryskyřicemi. Jedná se o polotovary plochého tvaru. Pryskyřičná matrice je vyztužena umělými vlákny, jako jsou například sklo, uhlík a aramid. Tvarují a vrství se ve formách do požadované tloušťky. Dotvarují a dotvrdí se za působení tepla a tlaku. Nejčastěji jsou používány epoxidové, polyesterové a vinylové pryskyřice. Vyrobené kompozitní materiály jsou tepelně odolné, vysoce pevné, extrémně lehké a tuhé. Hlavní výhodou je jednodušší výrobní proces. [1,,19,20]



Obrázek 17 Prepregy [18]

4.1 Vlastnosti a rozdělení prepregů

Použití prepreg systémů má velký vliv na vlastnosti a kvalitu výsledného kompozitu díky tomu, že odpadá proces prosycování výztuže pojivem. Nejčastěji jsou použity pro výrobu dílů v autoklávu nebo lisováním. Dostává se výrobek s výbornými mechanickými vlastnostmi. Důležitou předností prepregů jsou stejnosměrnost, hladkost hotových dílů a vysoký podíl vláknové výztuže. Mezi nevýhody se řadí vysoká cena, odpad při zpracování a skladování při stanovených podmínkách. Pokud by byly prepregy skladovány za pokojové teploty, docházelo by postupně k samovolnému vytvrzování pryskyřice, ztrátě tvarovatelnosti a lepidlosti. [1,19,20]

Výhody prepreg systémů při výrobě kompozitů:

- vysoce výkonný kompozitní materiál
- snadná výroba součástí
- úspora hmotnosti (ideální poměr výkonu a hmotnosti)
- skvělá kvalita impregnace
- konstantní kvalita materiálu
- přesná kontrola obsahu pryskyřice
- vysoký obsah vláken až 65%
- čistý proces
- snadná manipulace.

Nevýhody prepreg systémů při výrobě kompozitních materiálů:

- náklady
- Skladovatelnost (úložný prostor a skladování při různých teplotách).

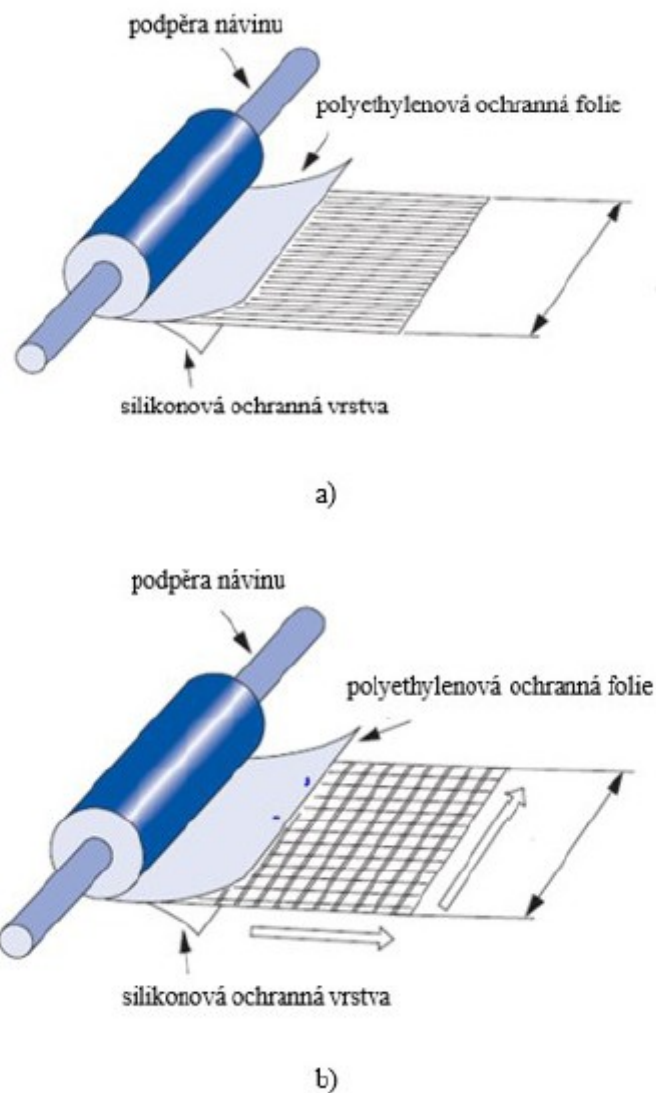
Rozdělení prepregů podle geometrie:

- jednostranné uspořádání vlákna (UD prepreg) tloušťka 0,1 - 0,15 mm
- vícevrstvé s jednotlivými vrstvami tkanin kladenými na sebe pod různými úhly
- tkaninový prepreg, vícesměrné uspořádání vláken
- kombinované s využitím tkanin a rohoží
- s prostorově vázanou pletenou nebo tkanou rohoží
- s výztuží ze skelných vláken.

4.2 Výroba prepregu

Výrobní proces prepregu probíhá prosycením vláknové výztuže, jednosměrného vlákna, tkaniny nebo více tkanin pryskyřicí a poté překrytím ochranou folií.

Jednou z alternativ je semipreg. Jedná se o technologii, která zachovává všechny výhody práce jako s prepregem. Rozdíl je v tom, že není potřeba využití autoklávy. Vytvrzovací teplota se pohybuje okolo 120°C. Tkanina se impregnuje pouze z jedné strany foliovou pryskyřicí. Semipreg se používá zejména v letectví, automobilovém průmyslu, stavbě lodí, zdravotnictví a sportovních potřebách.



Obrázek 18 Výrobní proces prepregu a) jednosměrného vlákna, b) tkaniny [22]

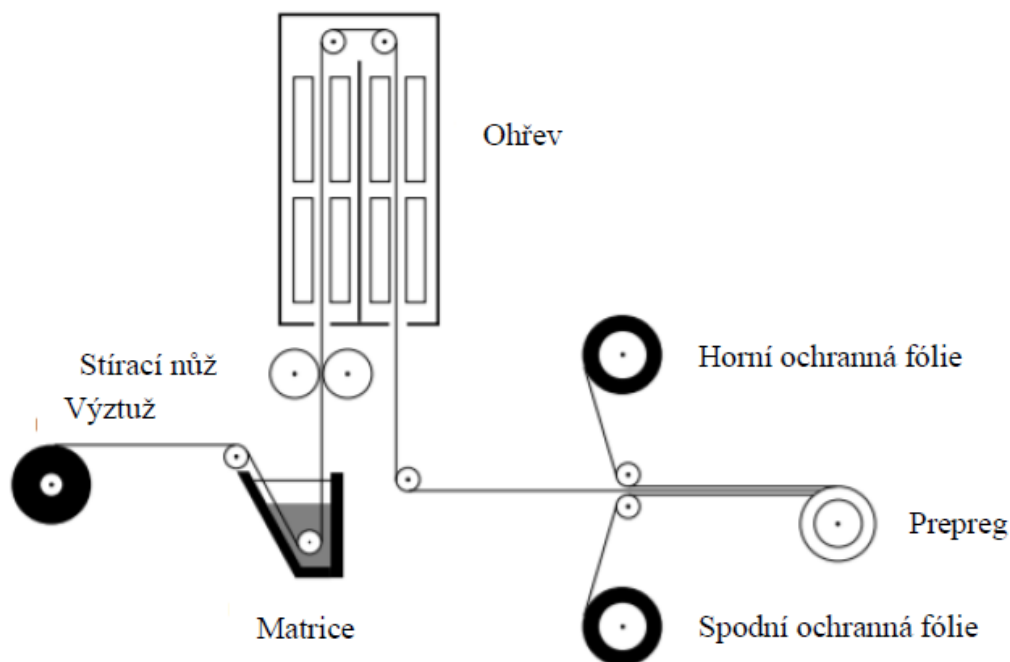
Během výroby kompozitů rozlišujeme na 3 fáze nebo též stavy pro pojiva. Jsou to „A-stav“, „B-stav“, „C-stav“. A-stav je nevytvrzená pryskyřice. Při B-stavu dochází k částečné polymerizaci pryskyřice (prepreg). C-stav představuje konečný kompozit, polymerizace matrice. B-stav mezistupeň mezi A-stavem a C-stavem (mezi nevytvrzenou a polymerizovanou maticí). Matrice B-stavu je již částečně zasít'ovaná. Aby neměl výsledný prepreg omezenou zpracovatelnost, musí být skladován v mrazicím boxu. Pokud by byl skladován v pokojové teplotě, byla by jeho zpracovatelnost jen několik dní. Výrobu prepregu v B-stavu lze rozdělit na 3 způsoby. První je fyzikální B-stav- rozpouštědlový způsob výroby. Druhý je fyzikální B-stav- systém horké taveniny. Třetí je chemický B-stav. Popis výhod a nevýhod jednotlivých způsobů je popsán v tabulce 1. [19,20,23]

Tabulka 3 Porovnání výrobních procesů B-stavu [19]

Typ procesu	Výhody	Nevýhody
rozpouštědlový způsob výroby	snadná impregnace nízká viskozita skladovatelnost	tvorba výparů rozpouštědla obsah zbytkového rozpouštědla riziko sedimentace
systém horké taveniny	snadná kontrola obsahu pryskyřice lepivost bez rozpouštědel	vysoká viskozita obtížná impregnace
chemický B-stav	snadná kontrola obsahu pryskyřice nastavitelná reaktivita bez rozpouštědel	riziko exotermické reakce reprodukovatelnost lepivosti

4.2.1 Rozpouštědlový způsob výroby

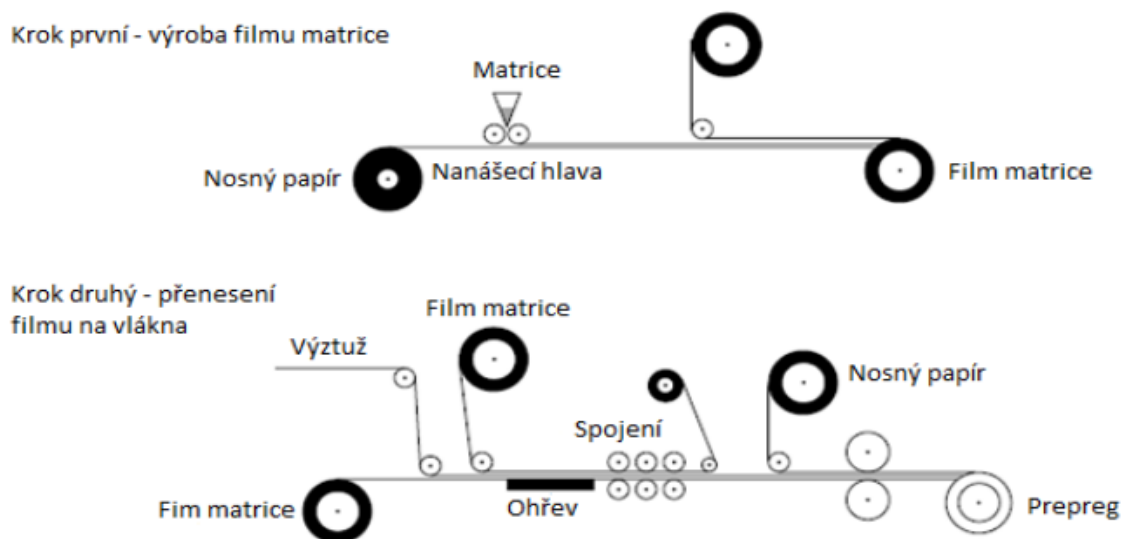
Prvním způsobem výroby je rozpouštědlový způsob výroby prepregu tzv. solvent dip process. Tímto způsobem lze vyrábět jen látkové prepregy. Rozpouštědlo způsobuje nízkou viskozitu pryskyřice. Rozpouštědlo je smícháno s pryskyřicí v lázni, do které je přivedena výztuž a je zde nasycena pryskyřicí. Poté v sušárně se odpaří rozpouštědlo, po odpaření rozpouštědla je prepreg rolován se speciální folií na role. Na obr. 19 je schéma procesu výroby rozpouštědlovým způsobem.[19,20,21]



Obrázek 19 Rozpouštědlový způsob výroby [21]

4.2.2 Výroba pomocí horké taveniny

Druhým způsobem výroby prepregu je výroba pomocí horké taveniny „Hot-melt“. Tento proces je založen na působení tepla a tlaku. Skládá se ze dvou výrobních fází. Využívá se pro jednosměrná vlákna nebo tkaniny. V prvním stupni je potažen papírový podklad slabou vrstvou pryskyřice. Druhý stupeň zahrnuje impregnaci vlákna nebo tkaniny, spojení vyztužujících vláken a pryskyřic. Za působení tepla a tlaku na vyhřívaných válcích dochází k trvalému spojení pryskyřice a vlákna. Poté je prepreg veden přes chladicí válce, je odstraněna vrstva papírového podkladu. Se speciální folií je výsledný prepreg rolován do rolí. Na obr. 18 je schéma výroby pomocí horké taveniny. [19,20,21]



Obrázek 20 Metoda výroby prepregu pomocí horké taveniny [21]

4.2.3 Výroba pomocí chemického B-stavu

Jedná se o podobný výrobní proces jako u metody horké taveniny. Je založena také na působení tepla a tlaku. Rozdíl je v tom, že není dvoustupňový. Vyztužující vlákna jsou nanášena už s nízko viskózní pryskyřicí na podkladový papír. Za působení tepla a tlaku na vyhřívaných válčích je pryskyřice impregnována do vlákna a dochází ke spojení. Prepreg je veden přes chladicí válečky a následně rolován se speciální folií na zásobníkové role. K částečnému zasíťování může dojít buď v peci 80-90°C, nebo při pokojové teplotě po dobu minimálně 24 hodin. [19,20,21]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

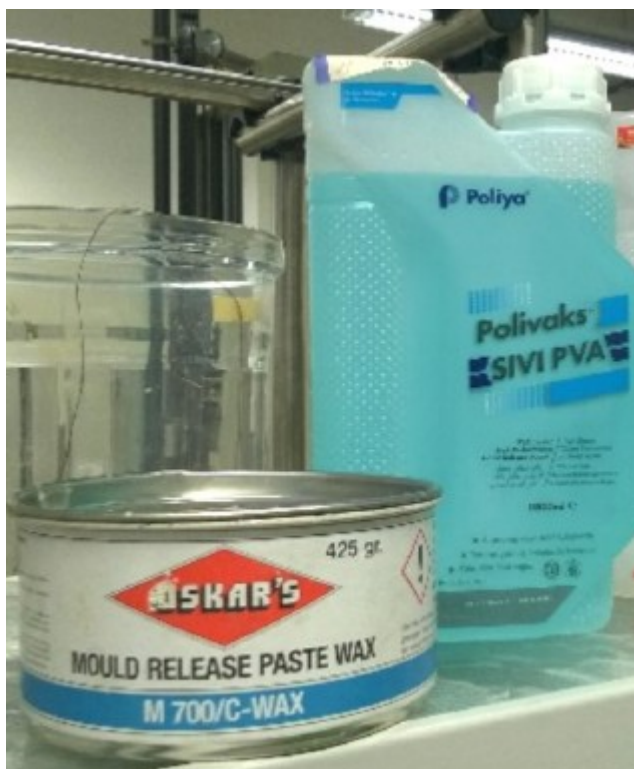
5 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Tématem mé diplomové práce je vliv použité technologie výroby na únavovou životnost kompozitních materiálů. Pro výrobu zkušebních těles jsem využíval prostory University Tomáše Bati ve Zlíně technologické fakulty U15 v laboratoři 308.

Zkušební tělesa jsou vyrobena metodou ručního kladení z uhlíkových a skleněných vláken, vakuovou infuzí ze skleněných vláken a lisováním jednosměrného deltapregu VV3430U s 34% podílu matrice.

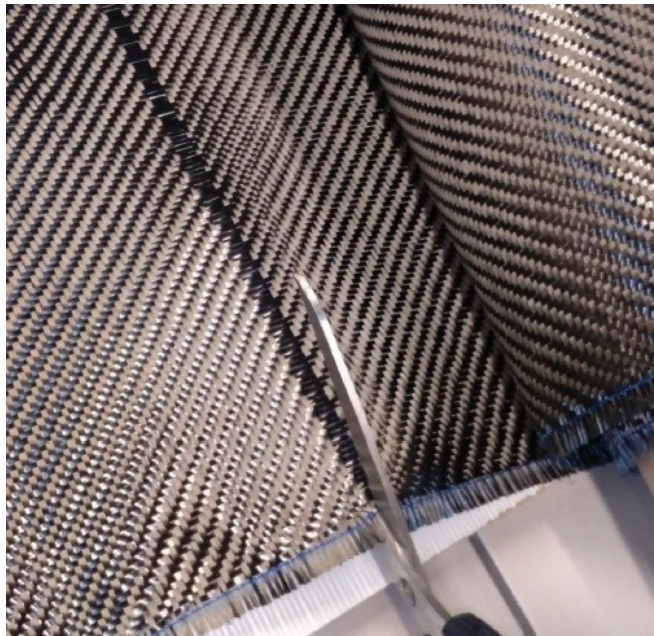
5.1 Příprava formy, tkaniny a matrice

Příprava formy je pro metodu ručního kladení a vakuové infuze totožná. Jako forma byla použita skleněná deska. Velmi důležité je důkladné očištění formy, protože od čistoty povrchu formy se odvíjí výsledná kvalita povrchu vyrobené desky. Po důkladném očištění byl na povrch formy nanesen separační vosk a poté byl rozetřen, tento postup se opakoval třikrát.



Obrázek 21 Separátor PVA a separační vosk

Rozměry tkanin byly přizpůsobeny velikosti formy tak, aby okraje tkaniny byly v dostatečné vzdálenosti od hrany formy. Vysunutím jednoho rovningu bylo zajištěno dosažení kolmosti.



Obrázek 22 Stříhání uhlíkové tkaniny

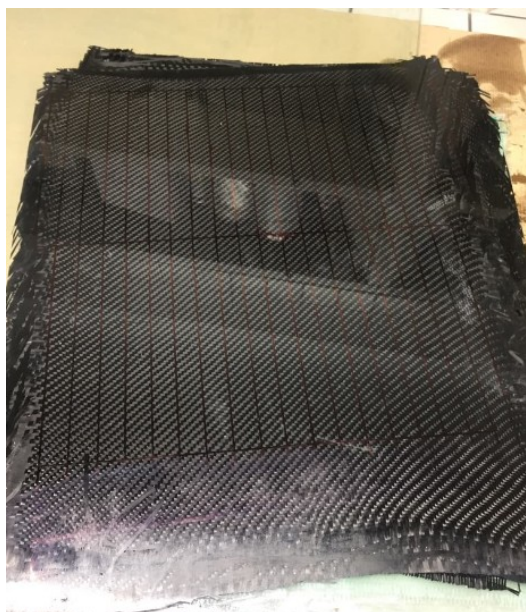
Pro přípravu matrice byla použita epoxidová pryskyřice HAVEL 285 a tužidlo H 285. Tato matrice je vhodná pro ruční laminaci skleněných, uhlíkových a aramidových vláken. Pryskyřice s tužidlem byly smíchány v poměru 100:40, dle poměru udávaného výrobcem. Pro zjištění množství matrice byla zvážena tkanina, její hmotnost byla vynásobena bezpečnostním koeficientem 1,3. Směs pryskyřice a tužidla je nutno dokonale rozmíchat. Proces laminace je třeba stihnout do té doby, než bude matrice nezpracovatelná. Při teplotě 20-25°C se jedná o dobu 2-3 hodin.



Obrázek 23 Smíchání epoxidové pryskyřice a tužidla

5.2 Ruční kladení

Před přípravou formy byla nastříhána tkanina na přibližný rozměr v.: 700 mm x š.: 400 mm v počtu 7 kusů pro skleněnou i uhlíkovou tkaninu. Dalším krokem bylo zvážení tkanin, aby bylo možno vypočítat potřebné množství matrice (viz 5.1). Po vyčištění a neseparování formy si připravíme matrici, která je nanášena na povrch formy pomocí válečku. Na tuto vrstvu matrice byla položena první vrstva tkaniny. Pro správné vyhlazení, prosycení matrice a tkaniny a také vytlačení vzduchových bublin použijeme váleček. Poté nanese vrstvu matrice a další kroky se opakují až do doby, kdy je nanášen potřebný počet tkanin. Druhý den byla deska po vytvrzení odformována.

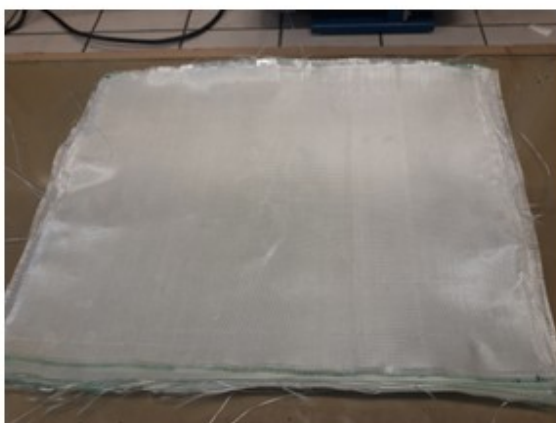


Obrázek 24 Deska vyrobena metodou ručního kladení

5.3 Vakuová infuze

Prvním krokem vakuové infuze byla příprava formy a pomocných materiálů. Forma byla připravena obdobně jako u ručního kladení. Rozdíl byl v tom, že necháme prostor ve vzdálenosti cca 10 cm od hrany formy bez separátoru, aby došlo k přilnutí těsnicí pásky k formě. Dalším krokem bylo nastříhání tkaniny, která byla připravena a zvážena. Poté jsme vynásobili hmotnost tkaniny bezpečnostním koeficientem 1,3 a tak jsme získali hmotnost matrice. Pryskyřice a tužidlo nesmíme zatím smíchat. Dále jsme si připravili odtrhovou a rozváděcí tkaninu s přesahem 2 – 3 cm přes vyztužovací tkaninu. Posledními kroky přípravy byly nastříhání vakuové folie, nachystání T spojek a spirálových bužírek.

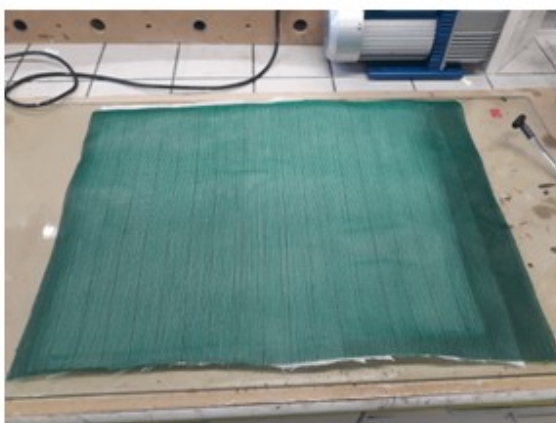
Vyztužující skleněná tkanina byla umístěna na povrch neseparované formy. Obdobně jako u metody ručního kladení bylo použito 7 vrstev tkaniny. Vyztužující tkanina byla překryta odtrhovou tkaninou a na ni byla umístěna rozváděcí tkanina. Na obou stranách byly umístěny doprostřed T spojky a na ně napojeny spirálové bužírky. Jedna T spojka byla napojena na vakuovou vývěvu a druhá na vtokovou hadičku. Všechny složky systému byly překryty vakuovou folií a utěsněny. Pro kontrolu těsnosti byla zaškrncena vtoková hadička a zapnuta vývěva. Při stabilním podtlaku je vše dostatečně těsné.



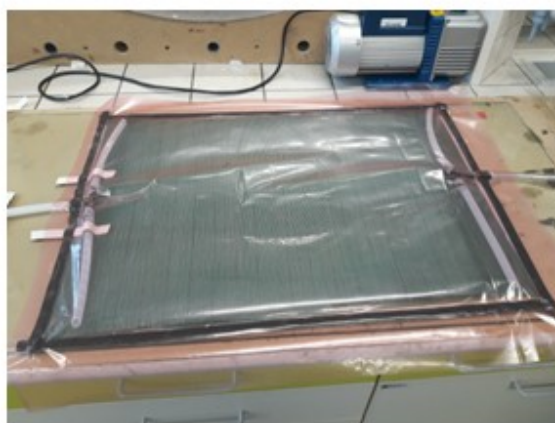
a



b



c



d

a) Umístění vyztužující tkaniny b) umístění odtrhové tkaniny c) umístění rozváděcí tkaniny d) utěsnění vakuové folie

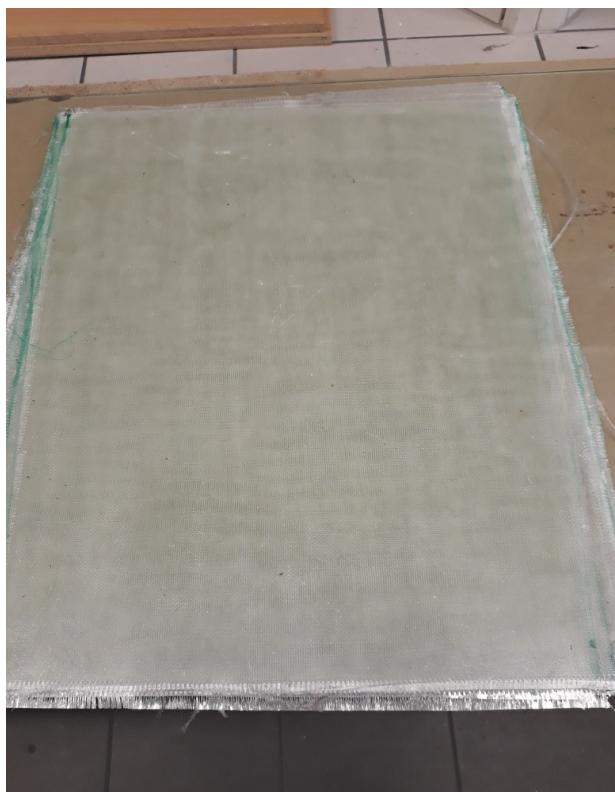
Obrázek 25 Postup výroby vakuové infuze

Poslední částí bylo smíchání pryskyřice a tužidla. Do této nádoby byla vložena vtoková hadička. Po zapnutí vývěvy se za pomoci podtlaku začala nasávat pryskyřice do tkaniny. Tento proces byl urychlen pomocí rozváděcí tkaniny. Po vysátí pryskyřice s tužidlem byla zaškrncena vtoková hadička. Po vypnutí vakua byla zaškrncena hadička vedoucí k zásobníku vakua.



Obrázek 26 Nasávání a rozvádění pryskyřice

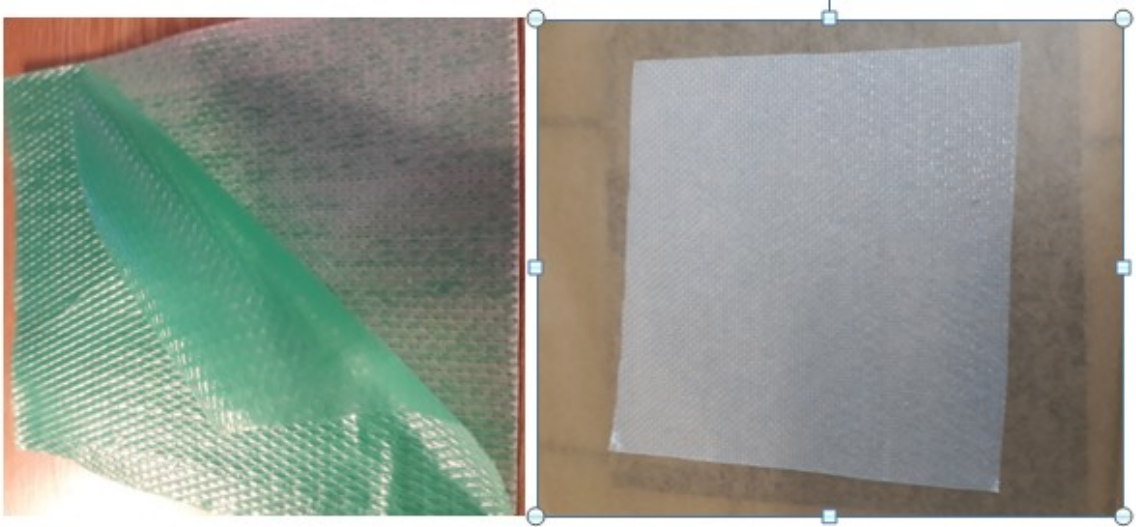
Druhý den bylo provedeno odformování desky po vytvrzení pryskyřice. Je nutné odstranit pomocné materiály. Odstranění bylo provedeno pomocí kleští a špachtle.



Obrázek 27 Kompozitní deska se skleněnou výztuží vyrobená vakuovou infuzí

5.4 Lisování prepregu

Prepreg po vytažení z mrazicího boxu (-18°C) byl rozstříhán na rozměry odpovídající velikosti formy 150x150 mm. Výrobní proces probíhal v co nejkratším čase, aby prepreg neztrácel lepivost. Jako separátor byl použit pečící papír, aby nedošlo k přilepení prepregu ke kovové formě. Nejprve byly z prepregu sloupnuty izolační plastové ochrany a poté byla první vrstva přilepena na separační pečící papír.



Obrázek 28 Odnímání ochranné folie a kladení první vrstvy

Kompozit se skládá z 5 vrstev prepregu. Prepregy na sebe byly vrstveny ve stejném směru, na vrchní vrstvu byl přiložen separační papír a ten byl přikryt vrchní deskou formy. Forma byla vložena do předem vyhřátého lisu na teplotu 150°C a zde byl kompozit lisován po dobu 15 min.



Parametry Lisu

Rozměry desek 250x250 mm

Příkon 2400 W

Maximální teplota lisu 200°C

Uzavírací síla 5 t

Obrázek 29 Lis Mitas

Po uplynutí 15 minut byla forma vyňata z lisu. Po odstranění kovových desek formy, byl odstraněn separační pečící papír a poté odstříhnuty kraje kompozitu.



Obrázek 30 Kompozit vyrobený z prepregu

5.5 Řezání zkušebních těles

Řezání zkušebních těles probíhalo za pomoci vodního paprsku.

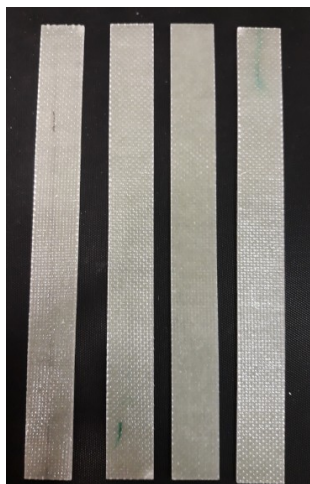
5.5.1 Zkušební tělesa vyrobené metodou ručního kladení se skleněnými vlákny

Zkušební tělesa vyrobené metodou ručního kladení se skládaly ze 7 vrstev skleněné tkaniny.

Rozměry tělesa:

Tabulka 4 Rozměry zkušebních těles se skleněnými vlákny

Délka – L [mm]	Šířka – b [mm]	Výška – a [mm]
200	20	2,2



Obrázek 31 Zkušební tělesa ze skleněných vláken

5.5.2 Zkušební tělesa vyrobené metodou ručního kladení se uhlíkovými vlákny

Zkušební tělesa vyrobené metodou ručního kladení se skládaly ze 7 vrstev uhlíkové tkaničky.

Rozměry tělesa:

Tabulka 5 Rozměry zkušebních těles s uhlíkovými vlákny

Délka – L [mm]	Šířka – b [mm]	Výška – a [mm]
200	20	2



Obrázek 32 Zkušební tělesa z uhlíkových vláken

5.5.3 Zkušební tělesa vyrobené vakuovou infuzí

Zkušební tělesa vyrobené metodou ručního kladení se skládaly ze 7 vrstev skleněné tkaniny.

Rozměry tělesa:

Tabulka 6 Rozměry zkušebních těles vyrobených vakuovou infuzí

Délka – L [mm]	Šířka – b [mm]	Výška – a [mm]
200	20	2



Obrázek 33 Zkušební tělesa vyrobené vakuovou infuzí

5.5.4 Zkušební tělesa vyrobené z prepregu

Zkušební tělesa vyrobené lisováním prepregu se skládaly z 5 vrstev.

Rozměry tělesa:

Tabulka 7 Rozměry zkušebních těles z deltapregu VV430U

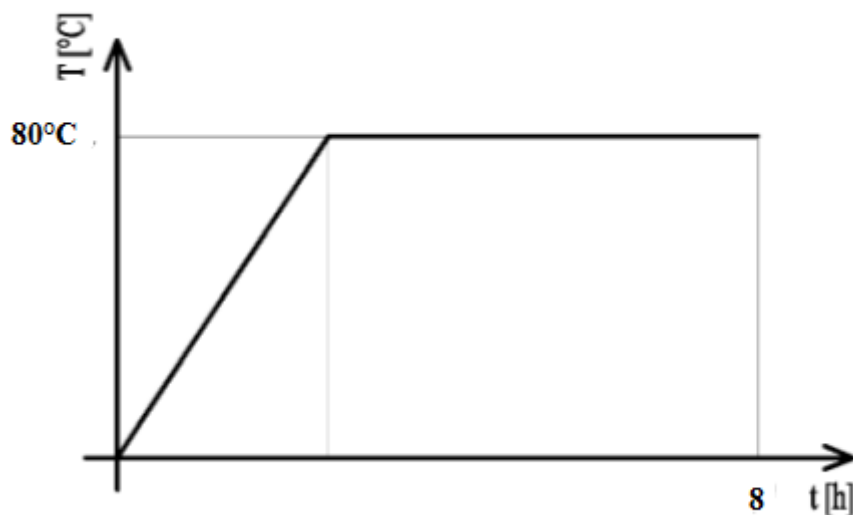
Délka – L [mm]	Šířka – b [mm]	Výška – a [mm]
150	20	1,6



Obrázek 34 Zkušební tělesa vyrobené z prepregu VV430U

5.6 Vytvrzování zkušebních těles v peci

Půlka zkušebních těles vyrobená metodou ručního kladení byla vytvrzena v peci. Byly vytvrzeny zkušební tělesa z uhlíkových a skleněných vláken. Vytvrzování probíhalo ve vestavné troubě značky Fagor, která se nachází v laboratoři na fakultě technologické Univerzity Tomáše Bati. Vytvrzování probíhalo při teplotě 80°C po dobu 8 hodin.



Obrázek 35 Průběh vytvrzování zkušebních těles



Obrázek 36 Vestavěná trouba Fagor

Tabulka 8 Parametry vestavěné trouby Fagor

Maximální příkon	2,2 kW
Spotřeba energie	0,79 kW
Rozmezí teplot	50 – 275°C
Šířka zařízení	592 mm
Výška zařízení	595 mm
Hloubka zařízení	552 mm
Hmotnost	34 kg

5.7 Materiály použité pro výrobu

Jednosměrný deltapreg VV340U 34%, viz příloha I.

Uhlíková tkanina KORDCARBON CC200 T4-160, viz příloha II.

Skelná tkanina aeroglass 280g/m², viz příloha III.

Matrice Havel L285, Tužidlo 285, viz příloha IV.

Separáčnı vosk Oskar´s M 700/C-WAX. M-700, viz příloha V.

6 STATICKÁ ZKOUŠKA

Statická tahová zkouška byla provedena na stroji ZWICK / ROELL vibrophore 100 za pomoci softwaru testXpert III. Tahová zkouška se provádí na trhačím stroji. Při tahové zkoušce se sleduje závislost tahového napětí σ na deformaci ϵ . U testovaných zkušebních těles se vyhodnocuje modul pružnosti E [MPa], u hodnot označených hvězdičkou (*) byl při měření použit extenzometr. Vzdálenost extenzometru byla 50 mm. Dále se vyhodnocují maximální síla F_{\max} [N], mez pevnosti v tahu σ_{Mt} [MPa], vykonaná deformační práce k maximální síle $W_{F_{\max}}$ [N.mm], poměrnou deformaci prodloužení při mezi pevnosti ϵ [%] a rozměry tělesa a a b . Statická tahová zkouška probíhala podle normy ČSN EN ISO 527-4.

6.1 Zkubšení stroj

ZWICK / ROELL vibrophore 100

Parametry stroje:

Maximální síla 1000 kN

Maximální amplituda síly 500 kN

Maximální testovací výška 2005 mm

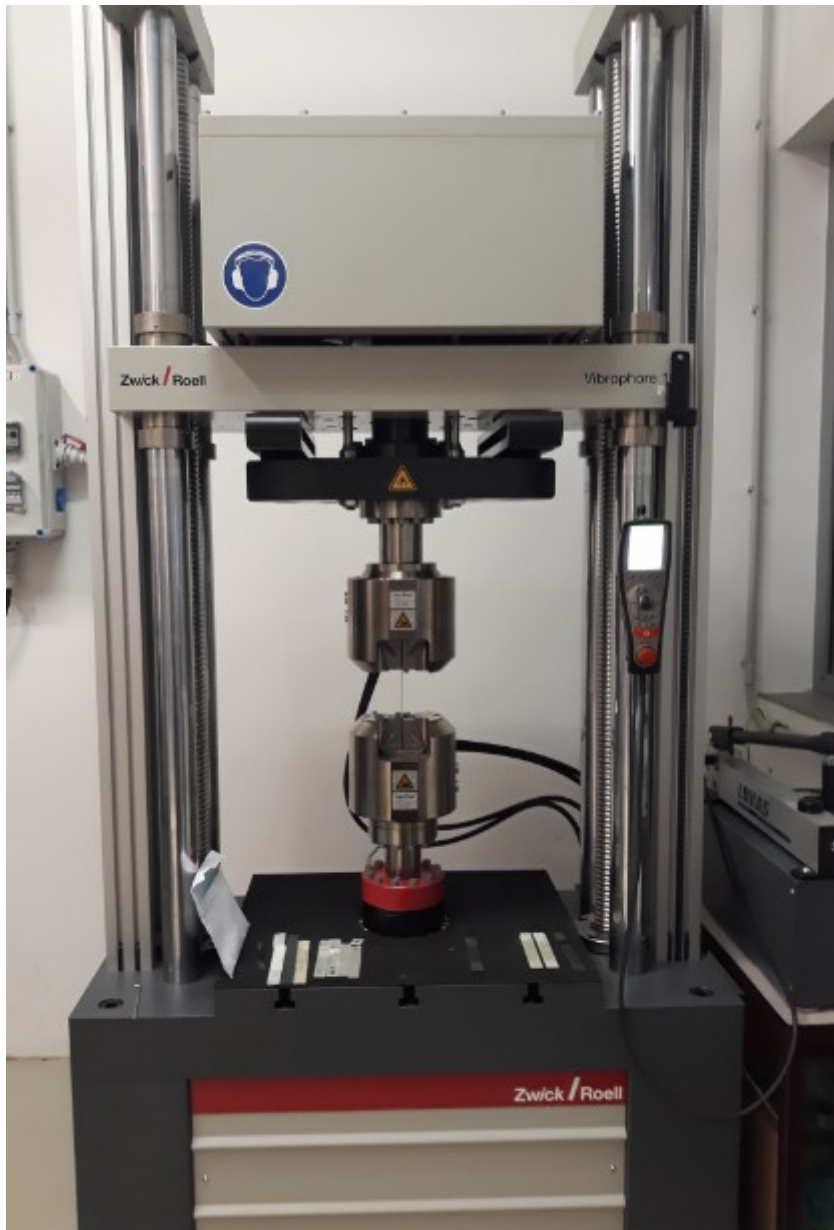
Maximální posuv příčnicku 1000 mm/ min

Rozsah frekvence 30 – 285 Hz

Zkušební parametry

Tabulka 9 Nastavené hodnoty měření na stroji

Nastavené hodnoty měření	
Rychlost zatížení	10 mm.min ⁻¹
Zatížení před	5 N
Rychlost před zatížením	5 mm.min ⁻¹
Rychlost při měření modulu pružnosti	5 mm.min ⁻¹
Vzdálenost čelistí	95 mm



Obrázek 37 ZWICK / ROELL vibrophore 100

Program testXpert vyhodnotil průměry hodnot \bar{x} , směrodatnou odchylku a variační koeficient dané série.

6.2 Naměřené hodnoty tahové zkoušky

6.2.1 Ruční kladení - skleněné vlákno

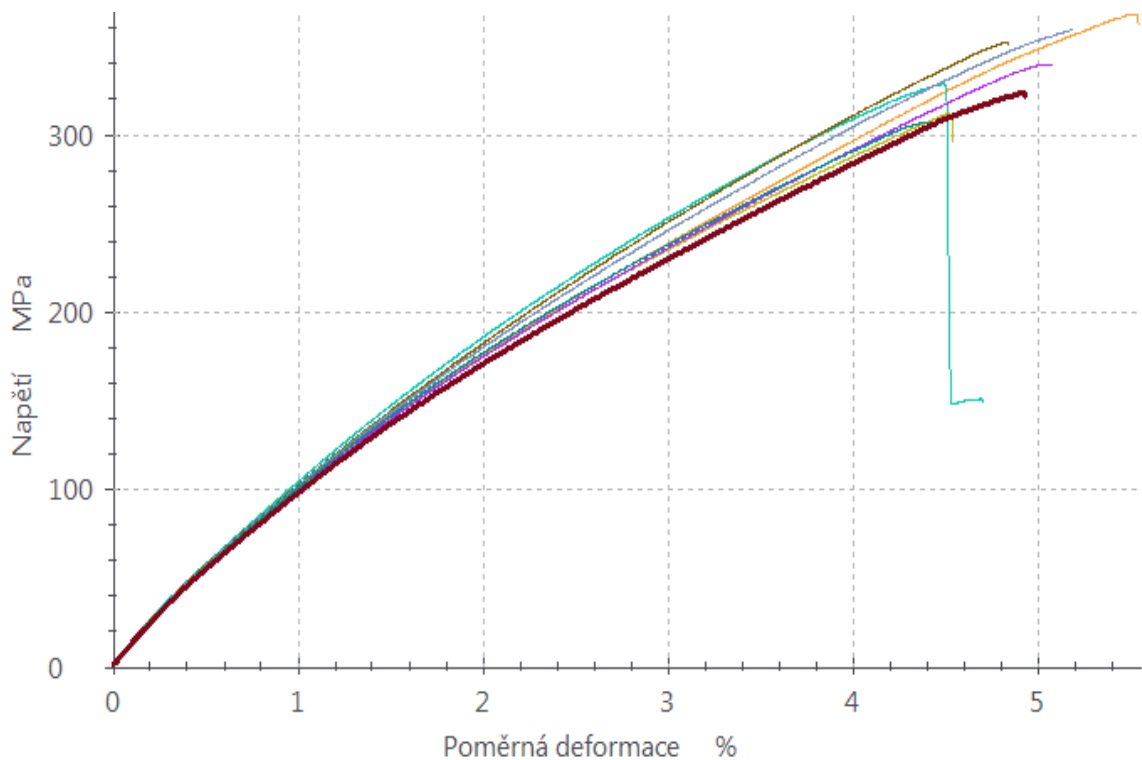
Výrobní metoda: ruční kladení

Matrice: Havel L285, Výztuž: 7 vrstev skleněné vlákno

Tabulka 10 Hodnoty statické zkoušky zkušebních těles ze skleněných vláken

Skleněné vlákno n=11	E [MPa]	F _{max} [N]	σ _{Mt} [MPa]	W _{Fmax} [N.mm]	ε [%]	a [mm]	b [mm]
n1	11900	16027	367,92	51379,72	5,5	2,2	19,8
n2	12200	14304	328,38	37474,15	4,5	2,2	19,8
n3	11500	14104	323,78	40407,58	4,9	2,2	19,8
n4	11700	13584	311,85	35537,43	4,5	2,2	19,8
n5	11800	14802	339,8	43177,44	5	2,2	19,8
n6	12100	15344	352,25	42401,24	4,8	2,2	19,8
n7	12000	15626	358,72	47000,88	5,2	2,2	19,8
n8	11900	13381	307,18	34396,84	4,4	2,2	19,8
\bar{x}	11900	14646	336,24	41471,91	4,9	2,2	19,8
s	239	964,91	22,151	5792,81	0,4	0	0
v	2,01	6,59	6,59	13,97	7,91	0	0
n9*	16700	15215	347,53	12435,23	2,9	2,2	19,9
n10*	16300	15941	364,12	14968,3	3,3	2,2	19,9
n11*	16600	16050	366,61	13353,55	3	2,2	19,9
\bar{x}	16500	15735	359,42	13585,69	3,1	2,2	19,9
s	197	454,05	10,371	1282,39	0,2	0	0
v	1,2	2,89	2,89	9,44	6,98	0	0

Hodnoty označené * měřeny s extenzometrem



Obrázek 38 Graf závislosti napětí na poměrné deformaci

V tabulce č. 10 jsou hodnoty získané při měření zkušebních těles ze skelné tkaniny. Prvních 8 těles bylo měřeno bez extenzometru, další 3 byly měřeny s extenzometrem. To je důvod, proč se liší. Důležitá hodnota je pro nás maximální síla F_{\max} , ze které budou vypočítány hodnoty zatěžujících sil při cyklování. Graf popisuje průběh hodnot meze pevnosti v tahu měřených vzorků v závislosti na napětí a poměrné deformaci.

6.2.2 Ruční kladení – uhlíková vlákna

Výrobní metoda: ruční kladení

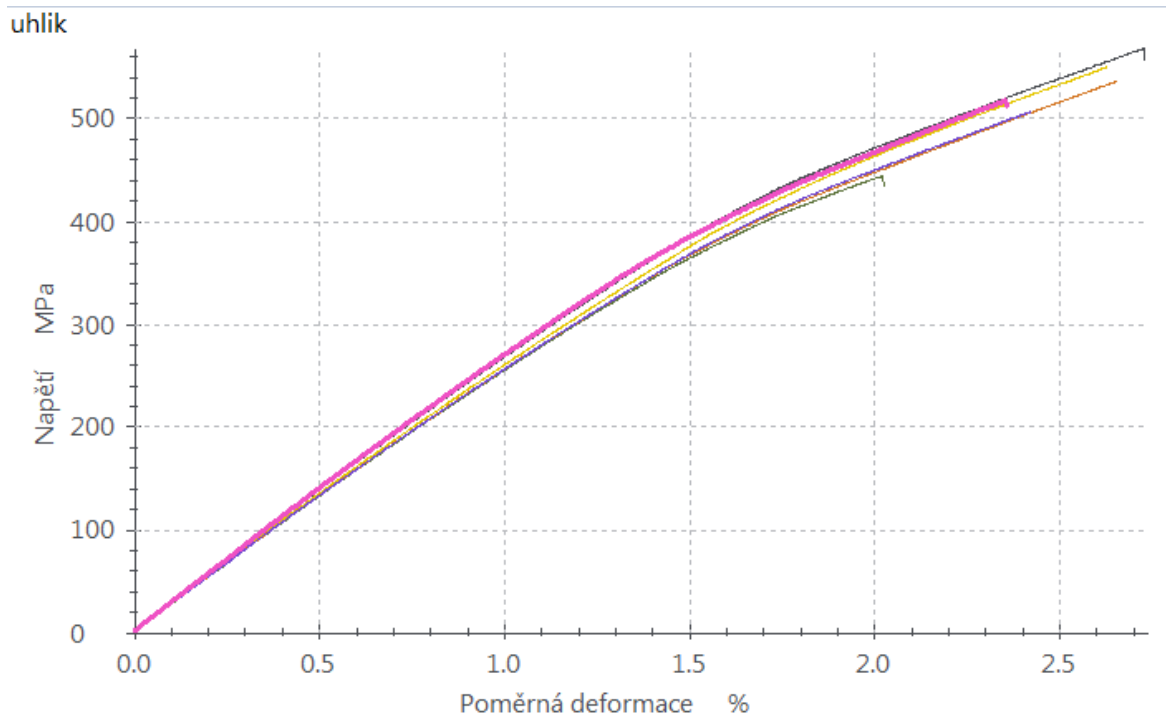
Matrice: Havel L285, Výztuž: 7 vrstev uhlíkové vlákno

Tabulka 11 Hodnoty statické zkoušky zkušebních těles z uhlíkových vláken

Uhlíkové vlákno n=9	E [MPa]	F _{max} [N]	σ _{Mt} [MPa]	W _{Fmax} [N.mm]	ε [%]	a [mm]	b [mm]
n1	27500	22519	568,66	35495,38	2,7	2	19,8
n2	26700	21795	550,37	32596,36	2,6	2	19,8
n3	26300	17599	444,42	19815,37	2	2	19,8
n4	26400	21255	536,74	32366,77	2,7	2	19,8
n5	27800	20510	517,94	27442,7	2,4	2	19,8
n6	26400	20087	507,26	27625,85	2,4	2	19,8
\bar{x}	26800	20628	520,9	29223,74	2,5	2	19,8
s	631	1721,1	43,463	5564,7	0,3	0	0
v	2,35	8,34	8,34	19,04	10,58	0	0
n7*	37100	15066	378,55	3731,2	1	2	19,9
n8*	47900	22437	563,74	6460,91	1,2	2	19,9
n9*	44900	18693	494,4	5579,04	1,1	1,9	19,9
\bar{x}	43300	18732	478,9	5257,05	1,1	1,967	19,9
s	5530	3685,4	93,563	1393,05	0,1	0,05774	0
v	12,77	19,67	19,54	26,5	8,31	2,94	0

Hodnoty označené * měřeny s extenzometrem

Výsledky zkušebních těles vyrobených ručním kladením s uhlíkovou tkaninou jsou uvedeny v tabulce 11. Tělesa 1-6 jsou měřeny bez extenzometru, 7-9 jsou měřeny s extenzometrem. Výsledky jsou z tohoto důvodu odlišné. Důležitá hodnota je pro nás maximální síla F_{\max} , ze které budou vypočítány hodnoty sil při cyklickém zatěžování. Graf popisuje průběh hodnot meze pevnosti v tahu měřených vzorků v závislosti na napětí a poměrné deformaci.



Obrázek 39 Graf závislosti napětí na poměrné deformaci uhlíkových zkušebních těles

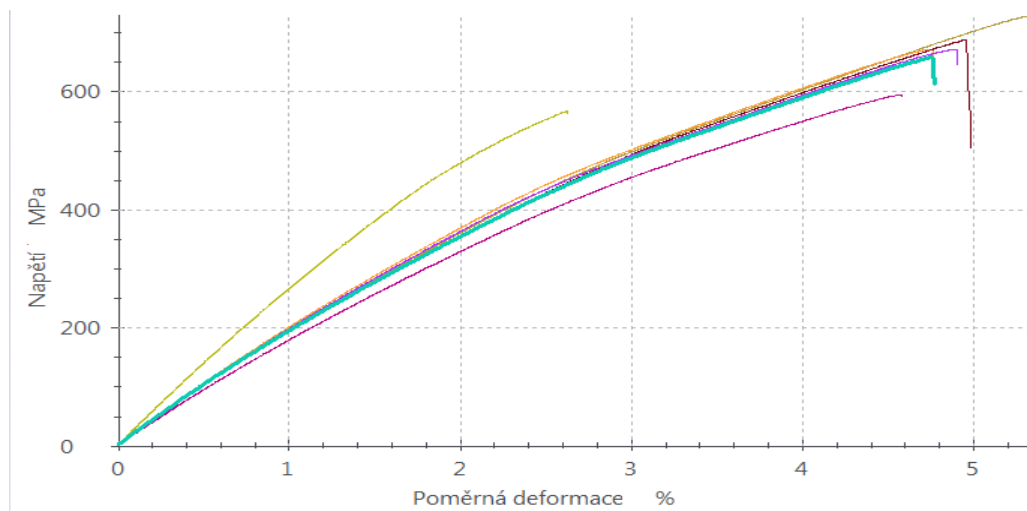
6.2.3 Deltaprepreg VV430u

Výrobní metoda: lisování prepregu

Materiál: Deltaprepreg VV430U

Tabulka 12 Hodnoty statické zkoušky zkušebních těles z deltaprepregu VV340U

VV340U n=7	E [MPa]	F _{max} [N]	σ _{Mt} [MPa]	W _{Fmax} [N.mm]	ε [%]	a [mm]	b [mm]
n1	18900	18868	595,59	30035,72	4,6	1,6	19,8
n2	20800	23078	728,46	42965,54	5,3	1,6	19,8
n3	21100	21292	672,1	35611,93	4,8	1,6	19,8
n4	20700	20876	658,96	34589,14	4,8	1,6	19,8
n5	20600	21803	688,23	37428,29	5	1,6	19,8
n6	28300	18078	567,79	25667,17	2,6	1,6	19,9
n7	20900	21297	672,25	36721,61	4,9	1,6	19,8
\bar{x}	21600	21200	654,77	34717,06	4,6	1,6	19,81
s	3030	1723,1	55,14	5538,34	0,9	0	0,0378
v	14,02	8,3	8,42	15,95	19,36	0	0,19



Obrázek 40 Graf závislosti napětí na poměrné deformaci

Výsledky statické zkoušky zkušebních těles jsou uvedeny v tabulce 12. Měření probíhalo bez extenzometru, protože již nebyl k dispozici. Hodnota maximální síly F_{\max} je 21 200 N. V grafu vidíme průběh hodnot meze pevnosti v tahu v závislosti na napětí a poměrné deformaci.

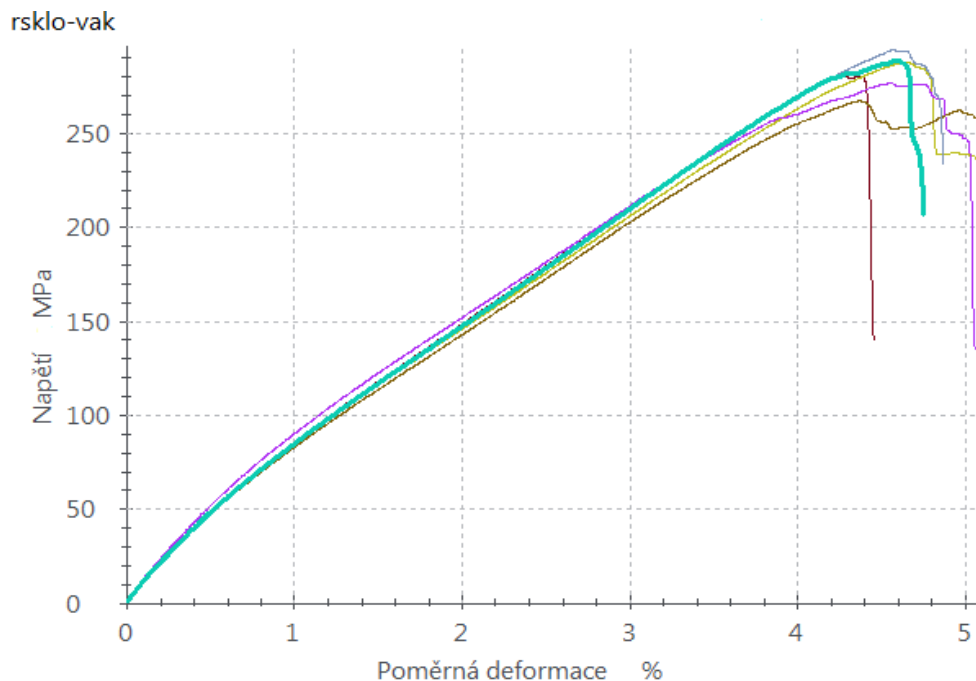
6.2.4 Vakuová infuze – skleněná vlákna

Výrobní metoda – vakuová infuze

Matrice: Havel L285, Výztuž: 7 vrstev skleněné vlákno

Tabulka 13 Hodnoty statické zkoušky zkušebních těles vyrobených vakuovou infuzí

Vakuová infuze n=6	E [MPa]	F_{\max} [N]	σ_{Mt} [MPa]	$W_{F_{\max}}$ [N.mm]	ε [%]	a [mm]	b [mm]
n1	9970	12696	288,55	31256,24	4,6	2,2	20
n2	10200	12383	281,44	27526,68	4,3	2,2	20
n3	10100	12664	287,83	31268,54	4,6	2,2	20
n4	10800	12179	276,76	31000,37	4,6	2,2	20
n5	9910	11755	267,16	27572,16	4,4	2,2	20
n6	9940	12959	294,53	31096,73	4,6	2,2	20
\bar{x}	10100	12439	282,72	29953,45	4,5	2,2	20
s	349	430,45	9,78	2590,87	0,1	0	0
v	3,44	3,46	3,46	6,23	3,2	0	0



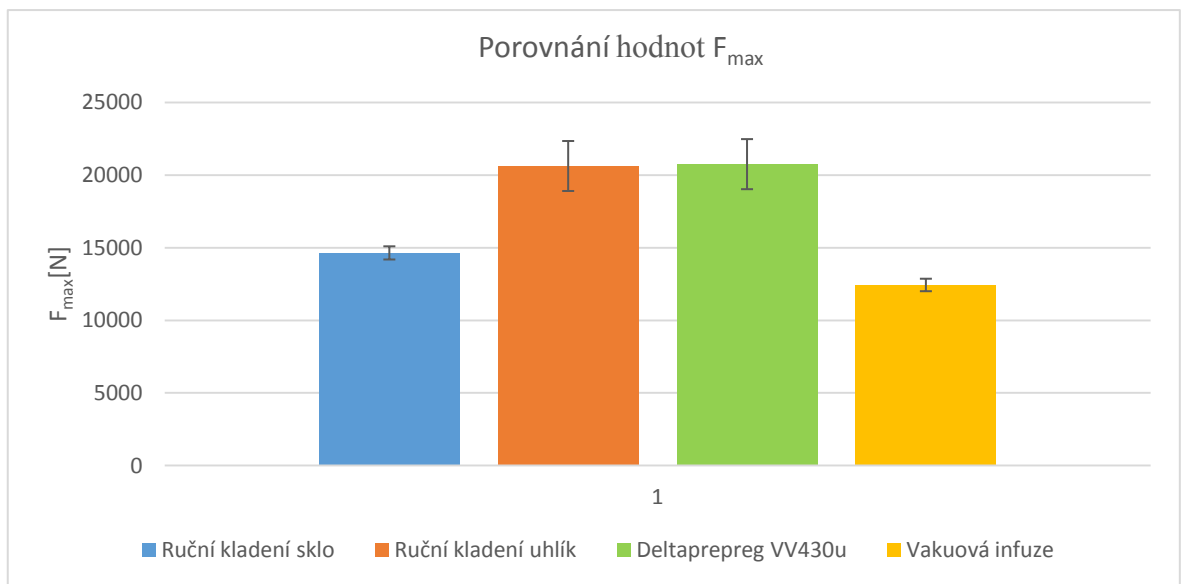
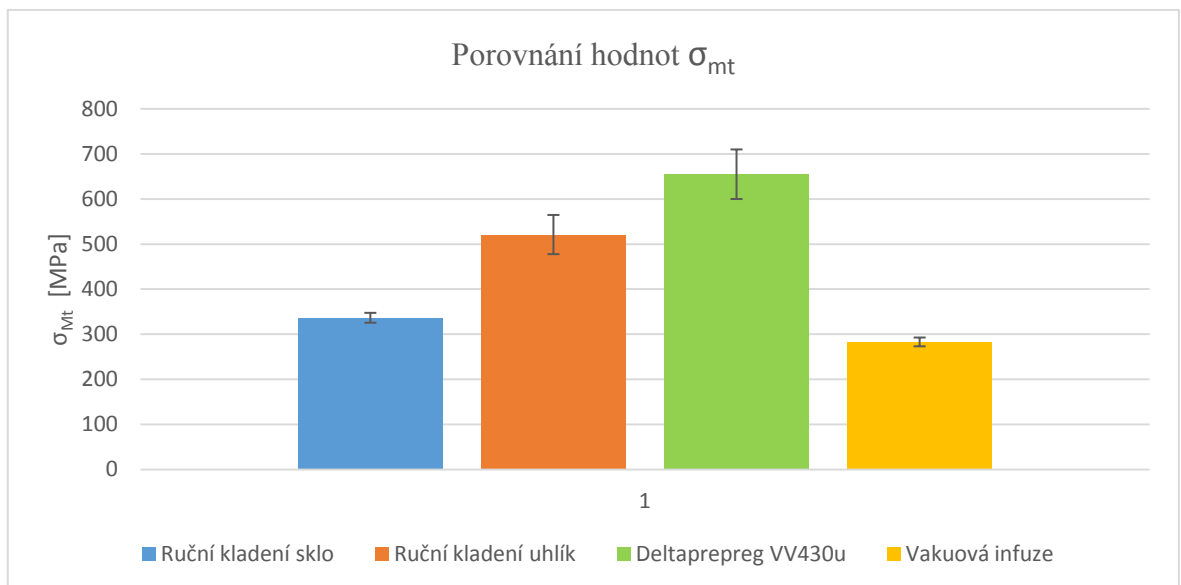
Obrázek 41 Graf závislosti napětí na poměrné deformaci u těles vakuové infuze

Výsledky zkušebních těles statické zkoušky vyráběných metodou vakuové infuze, neměly očekávané výsledky. Předpoklad byl, že výsledky budou lepší než u metody ručního kladení, která byla vyrobena ze stejného počtu skleněných vrstev a stejné matrice. Je to důsledkem chyby při výrobě. Nejspíš se jedná o nedostatečné utěsnění formy a odsátí velkého množství pryskyřice. Příčinou horší výsledků může být malé prosycení vzorků pryskyřicí.

6.3 Porovnání výsledků neměřených dat

Nejlepší výsledky statických zkoušek jsou u vzorků zhotovených z deltapregu VV 430U. Podobné výsledky byly dosaženy u zkušebních těles vyrobených metodou ručního kladení z uhlíkových vláken, ale jsou o něco nižší. U metody ručního kladení můžeme vidět rozdíly při použití tkaniny z uhlíkových a skleněných vláken. U vzorků vyrobených z uhlíkových vláken jsou výsledky vyšší, díky lepším mechanickým vlastnostem uhlíkových vláken. Nejhorší výsledky jsou u metody vakuové infuze, které byly zapříčiněny pochybení při výrobě, tato výrobní metoda byla nejsložitější a nejnáročnější.

Nejdůležitější z výsledků statických zkoušek je pro nás maximální síla F_{\max} . Tuto sílu potřebujeme znát a zní, vypočítáme velikosti zatížení při dynamických zkouškách. Porovnání naměřených hodnot jednotlivých výrobních metod je na obrázku 42.

Obrázek 42 Porovnání maximální síly F_{max} 

Obrázek 43 Porovnání meze pevnosti

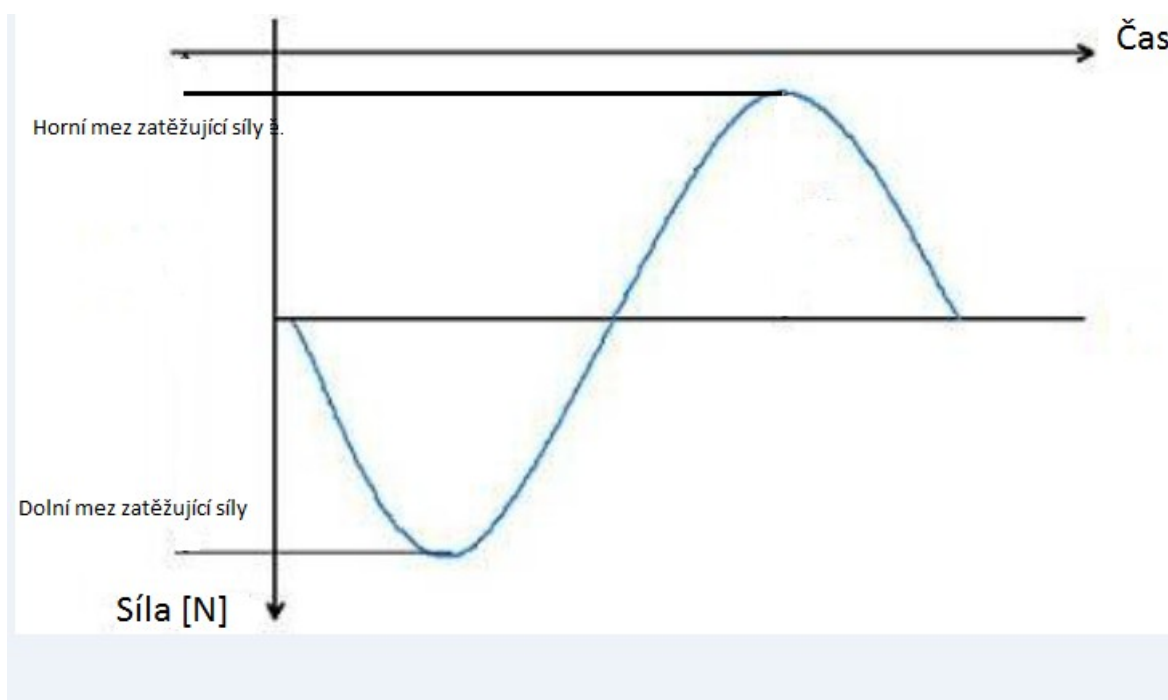
Na obrázku 43 můžeme vidět porovnání meze pevnosti v tahu. Nejlepší hodnoty vykazují vzorky zhotovené lisováním prepregu VV430U

7 DYNAMICKÉ ÚNAVOVÉ ZKOUŠKY

Cyklické zkoušky únavy materiálu probíhaly na stroji Zwick/Roell vibrophore 100 v prostorách dílen na fakultě aplikované informatiky University Tomáše Bati ve Zlíně budova U5. Vibrophore představuje poslední generaci vysokofrekvenčních pulsátorů. Je určen pro dynamické testování materiálů a zjišťování únavové životnosti, ale může také být použit jako plnohodnotný statický testovací stroj do 1000 kN.

7.1 Nastavující parametry zkoušky

Před měřením první zkoušky byl v softwaru testXpert R spuštěn program test controller, kterým jsme zjistili velikost frekvence, kterou si stroj sám zvolil jako nejvhodnější a to zda je zvolené zatížení měřitelné, a také jakou nejvyšší hladinu zatěžující síly jsme schopni měřit. Zatížení bylo vypočítáno z maximální síly F_{\max} a bylo zadáváno v podobě horní a dolní meze zatížení.



Obrázek 44 Sinusový průběh zatížení

Tabulka 14 Parametry zkušebních těles s uhlíkovými vlákny

Uhlíková vlákna	70 % F_{max}	60 % F_{max}	50 % F_{max}	40 % F_{max}
Frekvence	39,8 Hz	39,8 Hz	39,8 Hz	39,8 Hz
Horní mez zatěžující síly [N]	14 420	12 360	10 300	8 240
Dolní mez zatěžující síly [N]	200	200	200	200

Tabulka 15 Parametry zkušebních těles se skleněnými vlákny

Skleněná vlákna	40 % F_{max}	35 % F_{max}	30 % F_{max}	25 % F_{max}
Frekvence	33,8 Hz	33,8 Hz	33,8 Hz	33,8 Hz
Horní mez zatěžující síly [N]	5880	5145	4410	3675
Dolní mez zatěžující síly [N]	200	200	200	200

Tabulka 16 Parametry zkušebních těles vyrobených vakuovou infuzí

Vakuová infuze	40 % F_{max}	35 % F_{max}	30 % F_{max}	25 % F_{max}
Frekvence	33,5 Hz	33,5 Hz	33,5 Hz	33,5 Hz
Horní mez zatěžující síly [N]	4976	4353	3732	3110
Dolní mez zatěžující síly [N]	200	200	200	200

Tabulka 17 Parametry zkušebních těles deltaprepeg VV430U

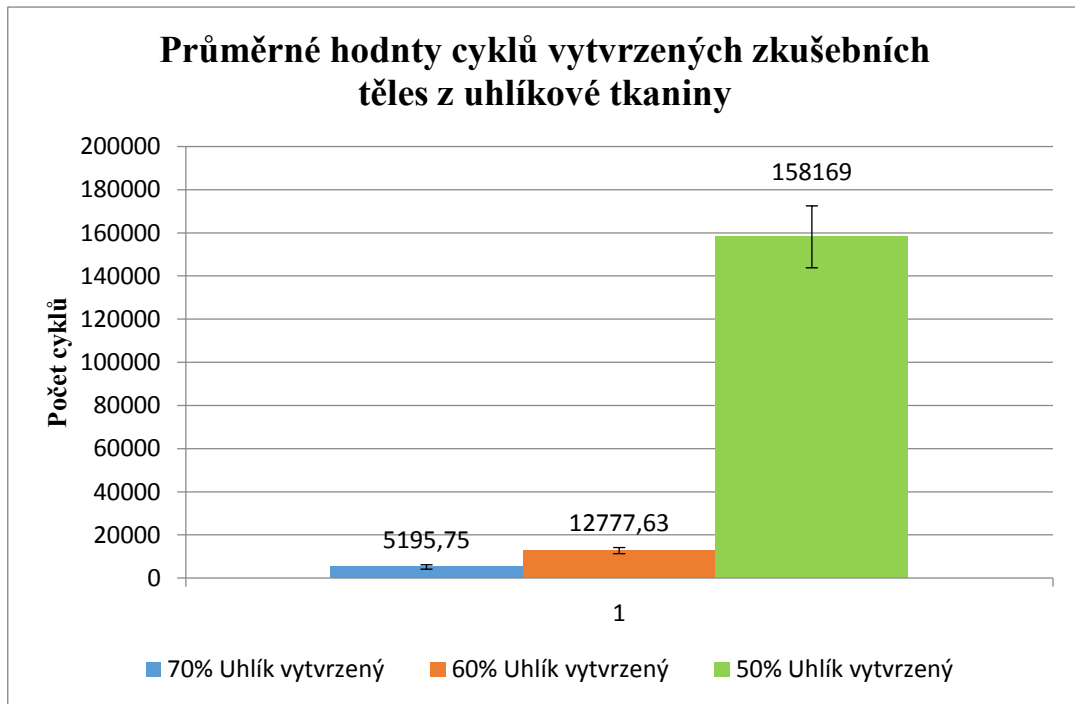
Prepreg VV340U	60 % F_{max}	50 % F_{max}	45 % F_{max}	40 % F_{max}
Frekvence	38 Hz	38 Hz	38 Hz	38 Hz
Horní mez zatěžující síly [N]	12 720	10 600	9540	8480
Dolní mez zatěžující síly [N]	200	200	200	200

7.2 Zkušební tělesa z uhlíkové tkaniny

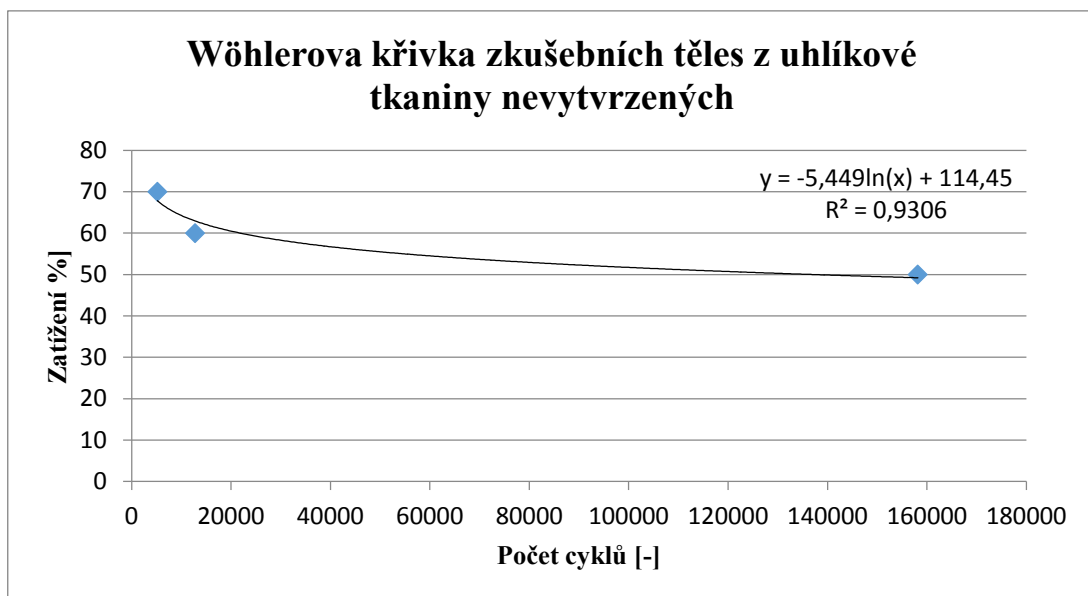
Zkušební tělesa se skládají ze sedmi vrstev uhlíkové tkaniny, půlka vzorků byla před testováním vytvrzena v peci při teplotě 80°C. Cyklické zkoušky byly provedeny při zatížení 70%, 60%, 50% a nevytvrzené vzorky byly zkoušeny i při 40% zatížení F_{max} .

Tabulka 18 Výsledky dynamické zkoušky uhlíkových těles vytvrzených

Uhlíková vlákna vytvrzená	Počet cyklů		
	70% F_{max}	60% F_{max}	50 F_{max}
$F_{max}=20600$ N			
1.1	4320	14467	181655
1.2	5514	13553	162819
1.3	6294	14120	138380
1.4	5291	11662	157768
1.5	5523	14124	150226
1.6	3518	10183	x
1.7	6749	12208	x
1.8	4357	11904	x
\bar{x}	5196	12777	158170
s	1007,6	1420,2	14339,3



Obrázek 45 Graf průměrných hodnot cyklů uhlíkových vytvrzených těles



Obrázek 46 Wöhlerova křivka těles s vytvrzenými uhlíkovými vlákny

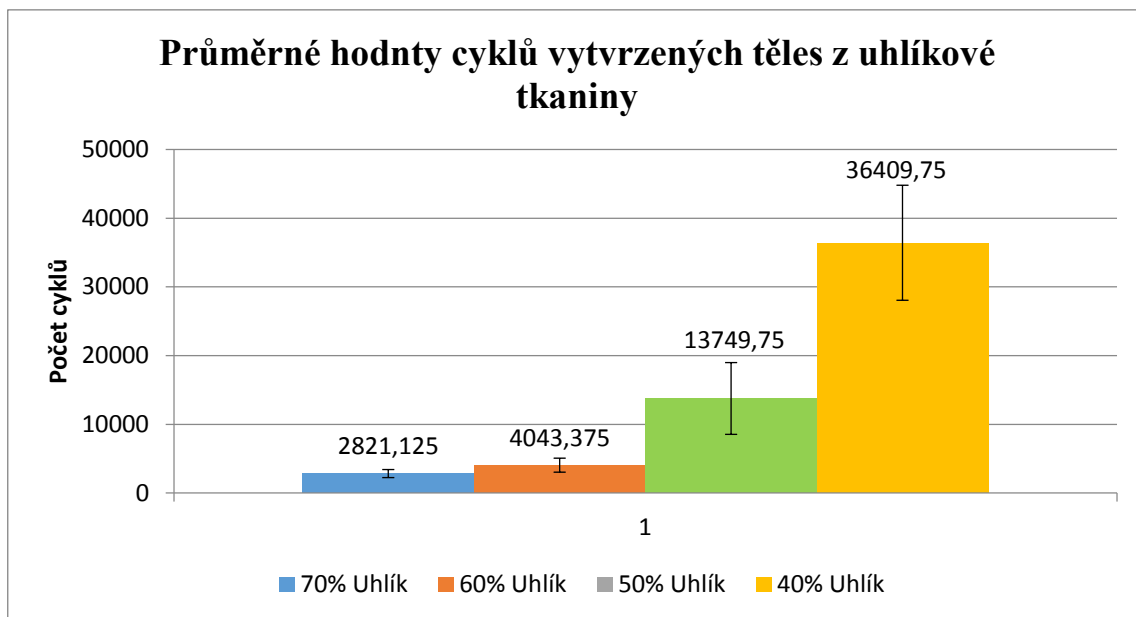
V tabulce 18 jsou zanesena data z cyklických zkoušek zkušebních těles s uhlíkovými vlákny, která byla vytvrzená v peci při 80°C. Zkušební tělesa byla dána na vytvrzení z důvodu jejich zahřívání při cyklickém zatěžování a následným porovnáním výsledků s tělesy nevytvrzenými bude zjištěno, zda teplota má vliv na počet cyklů, které těleso vydrží do poškození. Při zatížení 70% a 60% nebyl rozptyl počtu cyklů tak značný, jako u 50% zatěžující

síly, což se projevilo v rozsahu směrodatné odchylky. Průměry počtu cyklů jednotlivých zatížení byly použity k sestrojení Wöhlerovi křivky, která je zobrazena na obrázku 46.

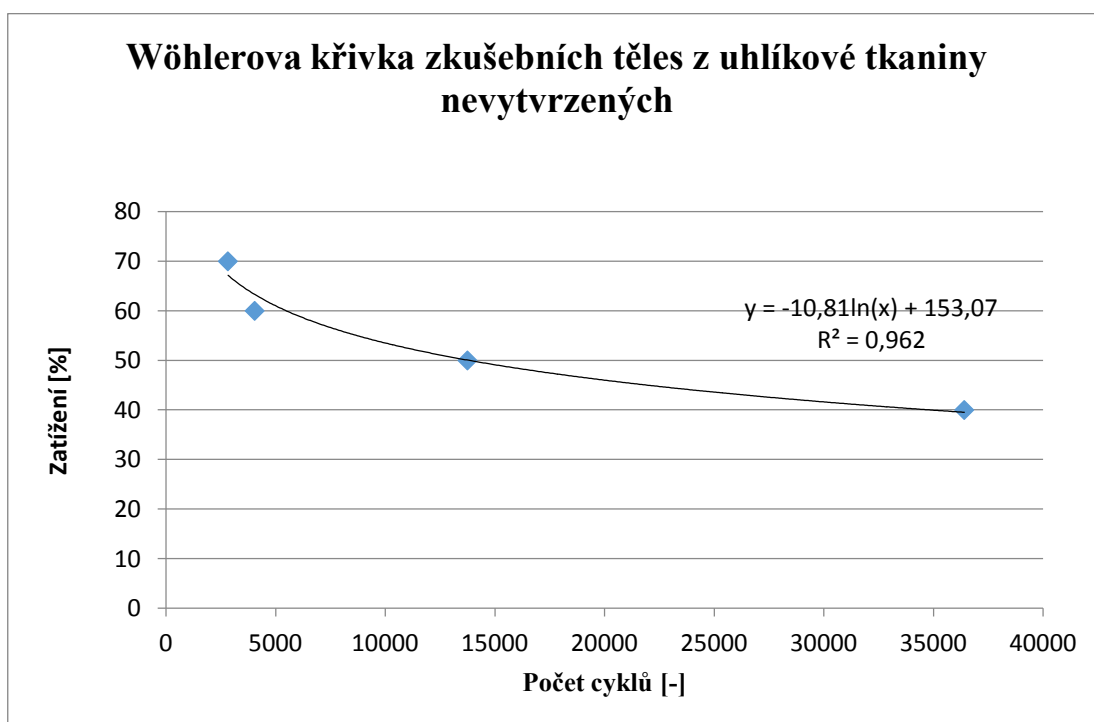
Výsledky zkušebních těles nevytvrzených

Tabulka 19 Výsledky dynamické zkoušky uhlíkových těles nevytvrzených

Uhlíková vlák- na nevytvrzená	Počet cyklů			
	$70\% F_{\max}$	$60\% F_{\max}$	$50\% F_{\max}$	$40\% F_{\max}$
$F_{\max}=20600 \text{ N}$				
1.1	3506	5195	17811	42778
1.2	1850	5656	11426	31648
1.3	2815	4275	10252	45990
1.4	2670	2394	15548	25223
1.5	2729	3333	10936	x
1.6	2100	3095	9244	x
1.7	3488	3922	9449	x
1.8	3411	4477	25332	x
\bar{x}	2821	4043	13749	36409
s	586,9	1019	5222,8	8368,9



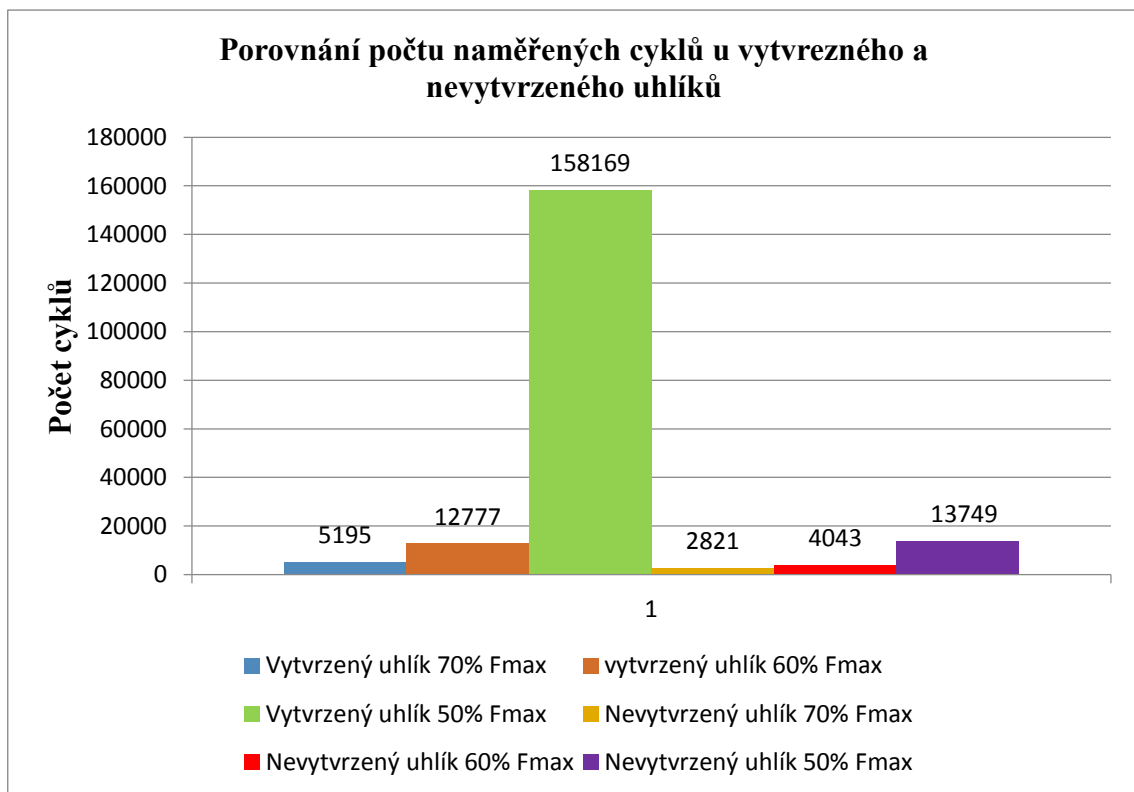
Obrázek 47 Graf průměrných hodnot cyklů uhlíkových nevytvrzených těles



Obrázek 48 Wöhlerova křivka těles s nevytvrzenými uhlíkovými vlákny

Průměrné hodnoty počtu cyklů byly nižší než, u zkušebních těles které byly vytvrzeny. Směrodatné odchylky jsou také větší, než u vytvrzených těles. Vlivem vznikající teploty, měly zkušební tělesa nestálé a nižší výsledky.

7.2.1 Porovnání hodnot zkušebních těles uhlíkových vláken



Obrázek 49 Porovnání počtu cyklů vytvrzených a nevytvrzených zkušebních těles s uhlíkovými vlákny

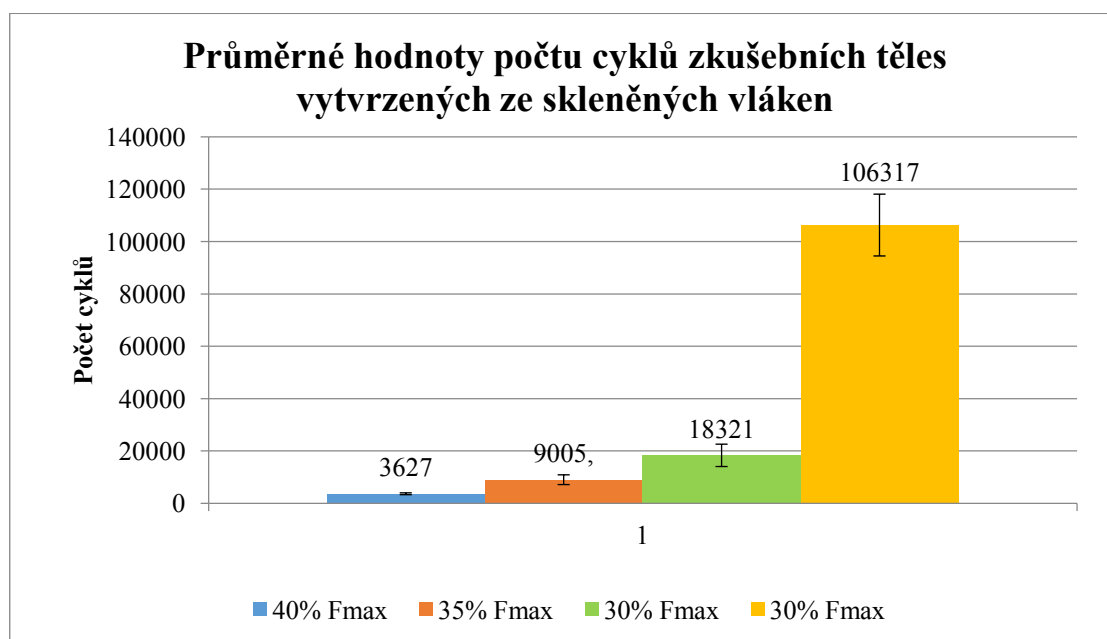
Zkušební tělesa při cyklickém zatěžování, které nebyly vytvrzeny v peci, se během měření zahřívaly a pryskyřice měkla. Vlivem tohoto zahřívání docházelo k poklesu odolnosti vzorků vůči cyklickému zatěžování. Porovnání nevytvrzených a vytvrzených vzorků s uhlíkovými vlákny vidíme na obrázku 49. Při zatížení 50% F_{max} je rozdíl, průměrných hodnot kolem 140 000 cyklů. Při vyšších zatíženích tento rozdíl nebyl, až tak značný. Na obrázku 47 si můžeme všimnout i mnohem většího rozptylu naměřených počtů cyklů, vlivem teploty neměly vytvrzené zkušební tělesa stálou hladinu porušování.

7.3 Zkušební tělesa ze skleněných vláken

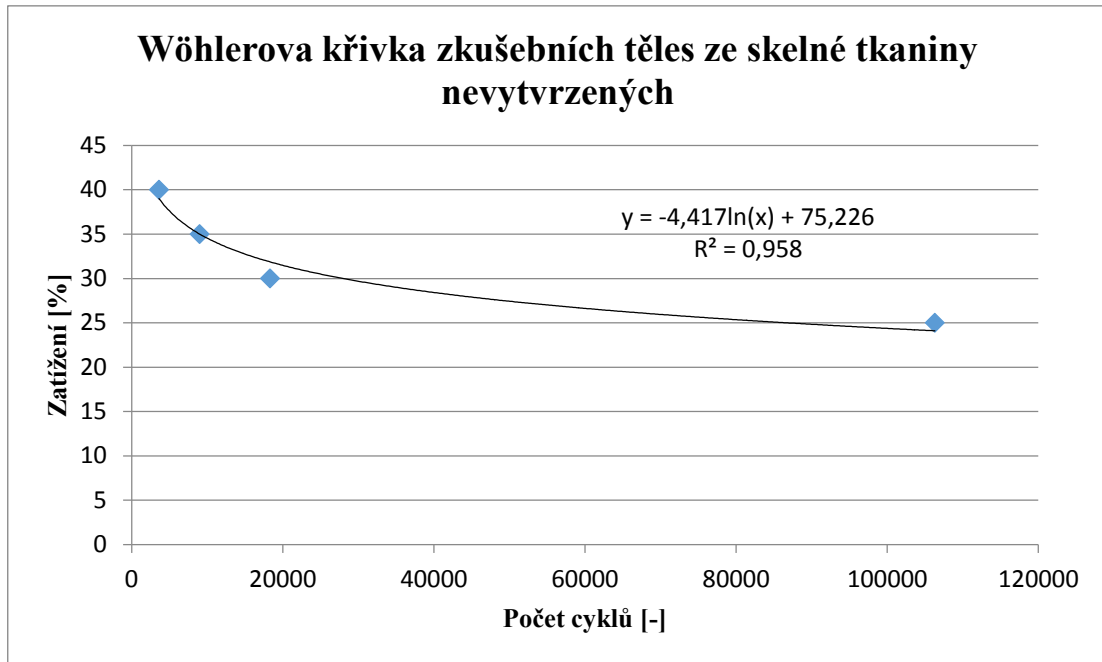
Zkušební tělesa se skládají ze sedmi vrstev skleněné tkaniny, půlka zkušebních těles byla před testováním vytvrzena v peci při teplotě 80°C stejně jako u zkušebních těles z uhlíkové tkaniny a jejich výsledky byly porovnány. Cyklické zkoušky byly provedeny při zatížení 40%, 35%, 30% a 25% zatížení F_{max} .

Tabulka 20 Výsledky dynamické zkoušky skleněných těles vytvrzených

Skleněná vlákna vytvrzená	Počet cyklů			
	40% F_{\max}	35% F_{\max}	30% F_{\max}	25% F_{\max}
$F_{\max}=14700$ N				
1.1	3460	8563	24156	85068
1.2	3616	7696	14590	105184
1.3	2962	6628	21442	108386
1.4	3936	6420	15899	112254
1.5	3922	10832	17552	120697
1.6	3870	9448	15097	x
1.7	x	11029	12962	x
1.8	x	11427	24870	x
\bar{x}	3627	9005	18321	106317
s	344	1862	4274	11824



Obrázek 50 Graf průměrných hodnot cyklů skleněných vytvrzených těles



Obrázek 51 Wöhlerova křivka těles s vytvrzenými skleněnými vlákny

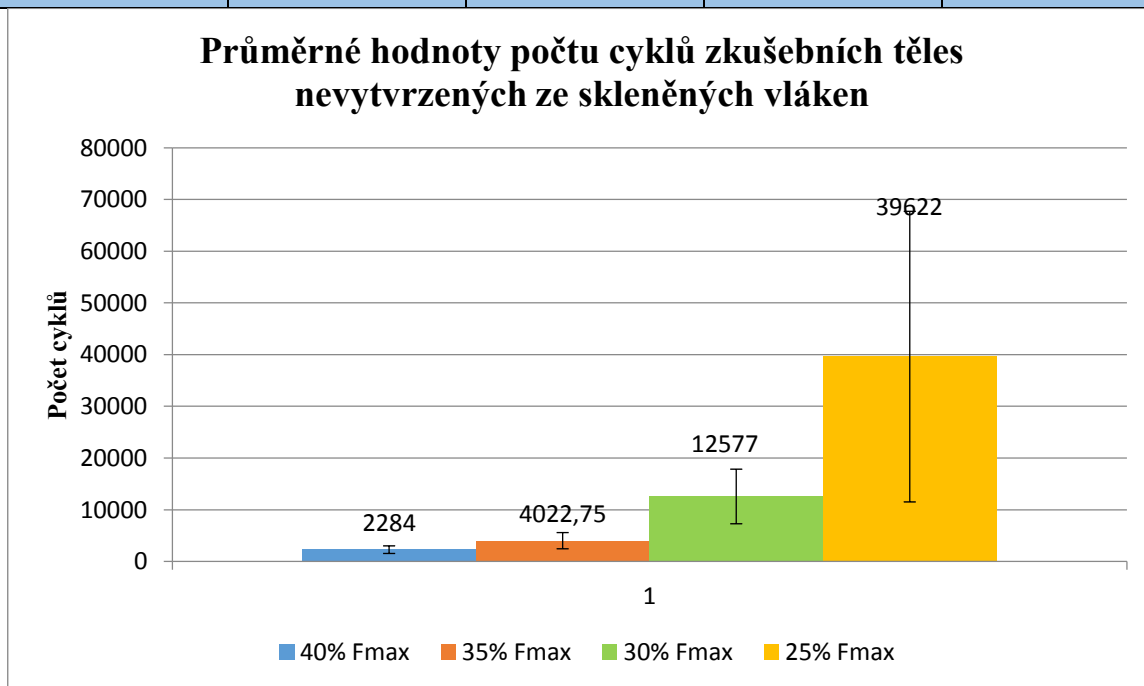
Zkušební tělesa vyrobené ze skelných vláken byly zkoušeny při nižších zatíženích než vzorky s uhlíkovými vlákny. Při zatížení 25% vzorky vydržely největší počet cyklů, ale toto zatížením má také největší rozptyl dat. Tyto rozdíly mohou být způsobeny nedostatečným prosycením pryskyřicí nebo vzduchovými bublinami v některých místech zkušebních těles. Průměrné hodnoty počtu cyklických zkoušek byly využity při sestavení křivky životnosti (obr. 51).



Obrázek 52 Zkušební těleso ze skleněné tkaniny po dynamické zkoušce

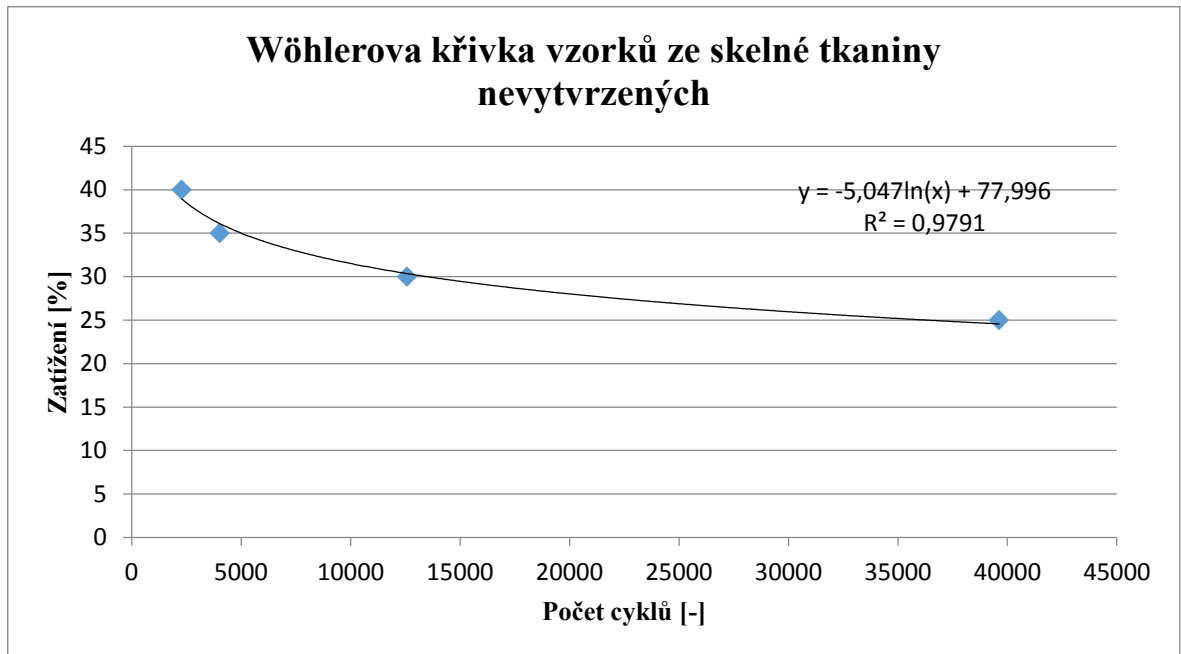
Tabulka 21 Výsledky dynamické zkoušky skleněných těles nevytvrzených

Skleněná vlákna nevytvrzená	Počet cyklů			
	40% F_{\max}	35% F_{\max}	30% F_{\max}	25% F_{\max}
$F_{\max}=14700$ N				
1.1	1307	4027	4568	15592
1.2	2445	2282	4697	26473
1.3	2918	2036	15455	57583
1.4	2803	5819	16189	12538
1.5	1061	5311	13280	85924
1.6	3187	6256	19105	x
1.7	2674	2339	14745	x
1.8	1877	4112	x	x
\bar{x}	2284	4022	15777	39622
s	731	1568	5283	28108



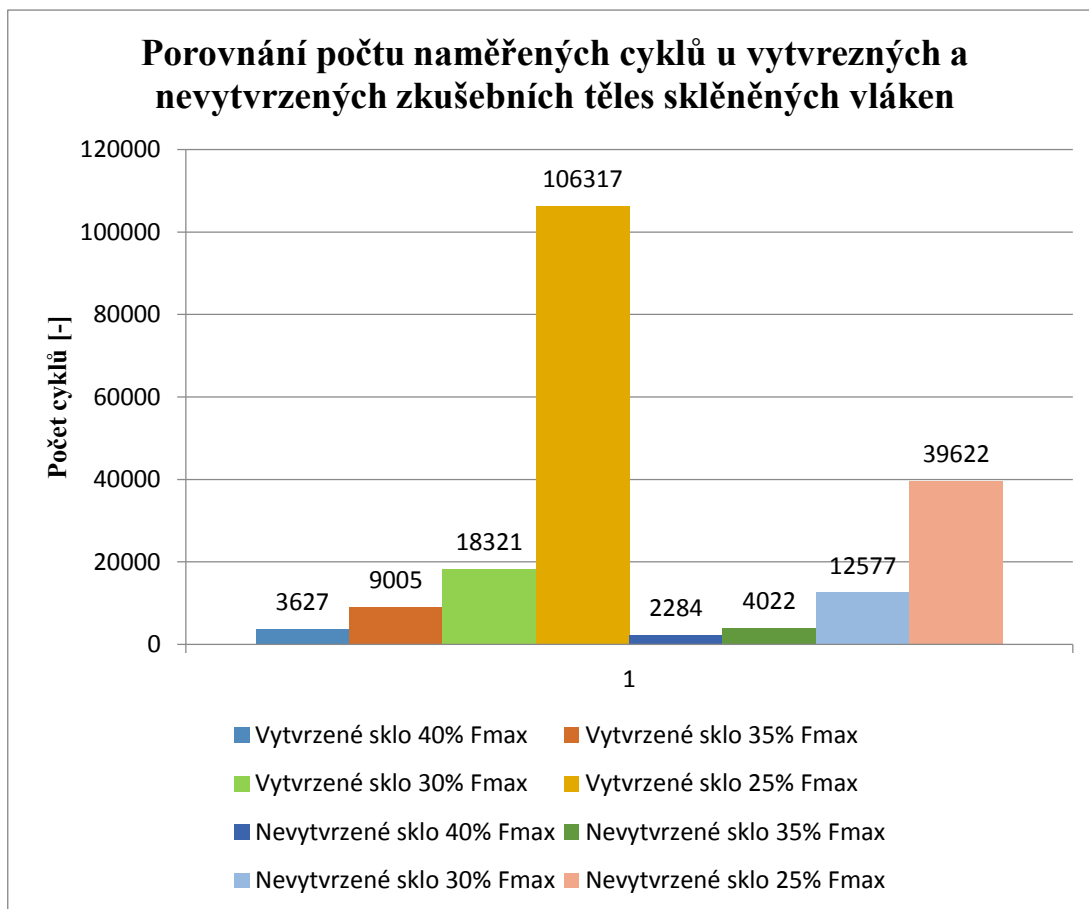
Obrázek 53 Graf průměrných hodnot cyklů skleněných nevytvrzených těles

Výsledky byly nižší než u zkušebních těles vytvrzených v peci. Rozdíly nebyly tak velké, jako u uhlíkových vláken. Velký rozdíl byl i v rozptylu měřených dat, kdy směrodatná odchylka dosáhla u 25% F_{\max} hodnoty 28 108 cyklů. Toto bylo způsobeno zahříváním a měknutím tělesa při zkoušce.



Obrázek 54 Wöhlerova křivka těles s vytvrzenými neskleněnými vlákny

7.3.1 Porovnání vzorků skleněných vláken



Obrázek 55 Porovnání vytvrzených a nevytvrzených těles se skleněnými vlákny

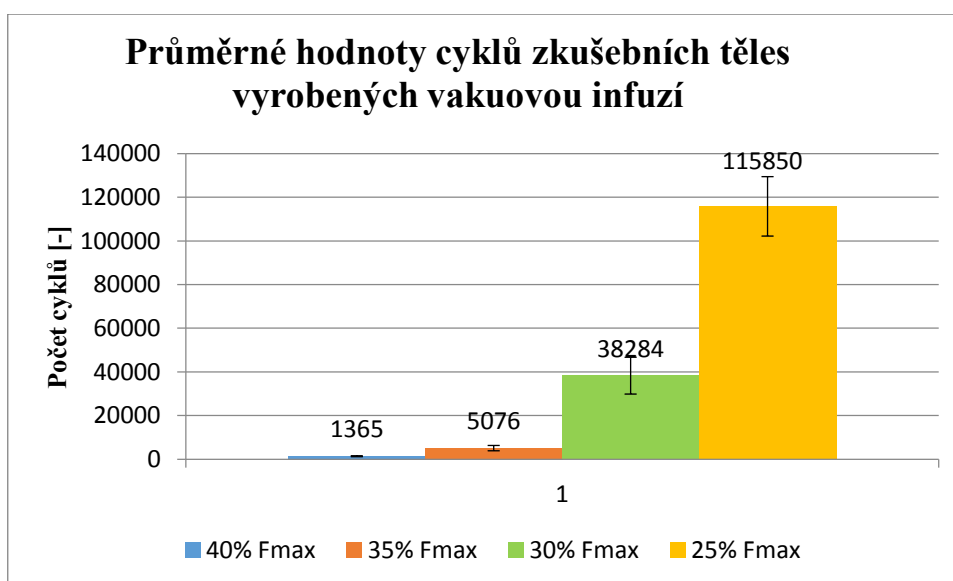
Půlka zkušebních těles vyrobených ze skleněných vláken, metodou ručního kladení byla dána na dotvrzení do pece. To se projevilo při měření dynamických zkoušek. Zkušební tělesa, která nebyla vytvrzeny se při měření zahřívala a vlivem teploty docházelo k poklesu naměřených cyklů. Rozdíl není tak značný jako u vzorků vyztužených uhlíkovými vlákny. Při nejnižším zatížení 25% je rozdíl průměrných hodnot přes 60 000 cyklů. Zkušební tělesa nevytvrzená měla značný rozptyl počtu výsledných cyklů. Vlivem teploty byly jejich výsledky nestálé. Porovnání hodnot je zobrazeno na obrázku 55. Vzorky vytvrzené vydržely vyšší počty cyklů a také měly menší rozptyl dat.

7.4 Zkušební vzorky vyrobené vakuovou infuzí

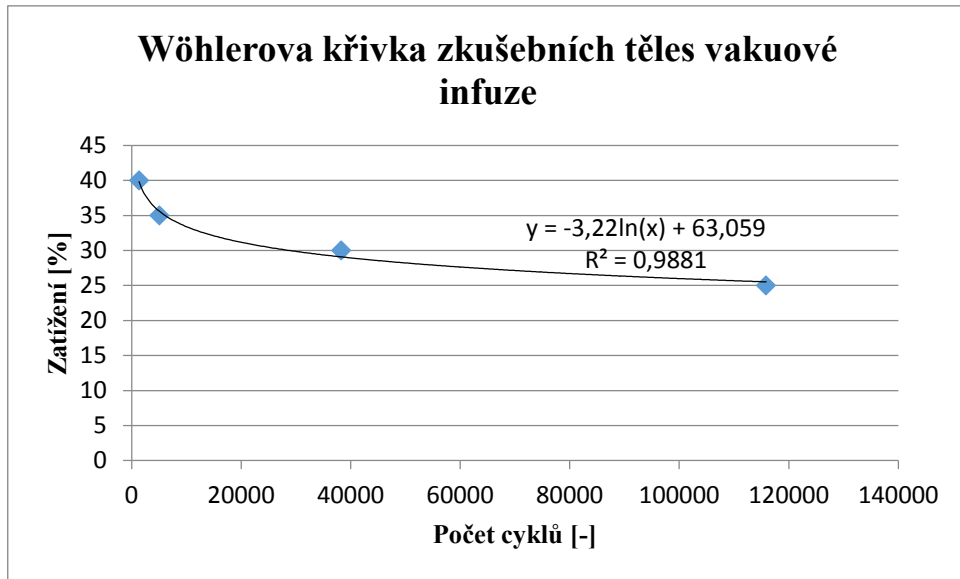
Zkušební tělesa se skládají ze sedmi vrstev skleněné tkaniny, vzorky byly vyrobeny metodou vakuové infuze. Vlivem chyby při výrobě nemají cyklické zkoušky odpovídající počet cyklů. Cyklické zkoušky byly provedeny při zatížení 40%, 35%, 30% a 25% zatížení F_{\max} .

Tabulka 22 Výsledky dynamické zkoušky těles vyrobených vakuovou infuzí

Vakuová infuze	Počet cyklů			
	40% F_{\max}	35% F_{\max}	30% F_{\max}	25% F_{\max}
$F_{\max}=12439\text{ N}$				
1.1	1150	4085	41663	127178
1.2	1580	5861	39685	117250
1.3	x	3541	24599	93223
1.4	x	4942	51065	125752
1.5	x	6951	41558	x
1.6	x	x	31139	x
\bar{x}	1365	5076	38284	115850
s	215	1223	8424	13604



Obrázek 56 Graf průměrných hodnot cyklů těles vakuové infuze



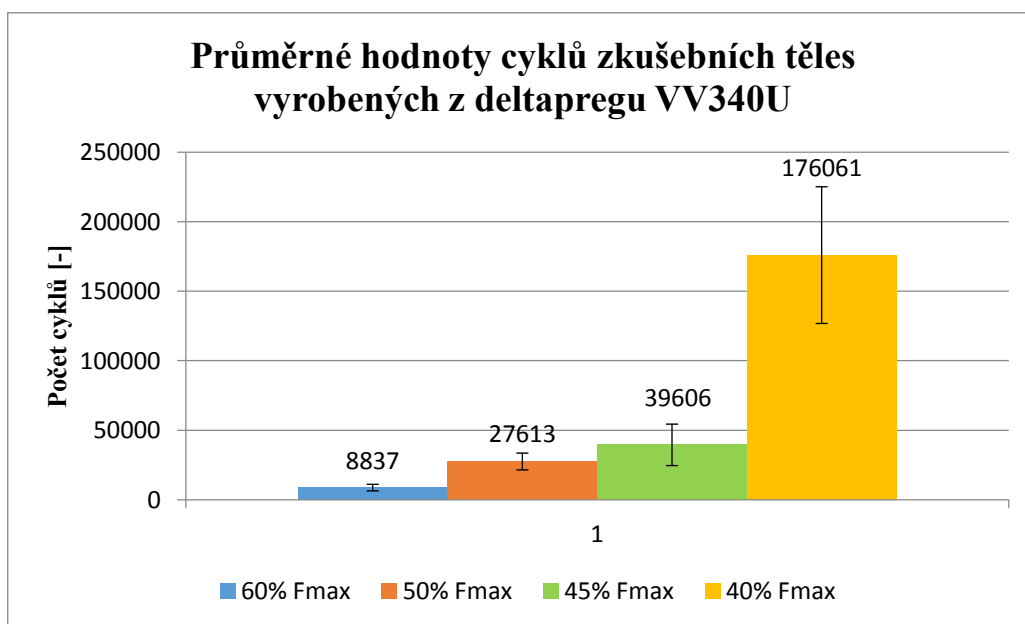
Obrázek 57 Wöhlerova křivka vakuové infuze

Výsledky cyklických zkoušek jsou ovlivněny nedostatečným prosycením pryskyřicí. Výsledky jsou podobné jako u metody ručního kladení se skleněnými vlákny. Výsledky průměrných hodnot cyklických zkoušek jsou zobrazeny na obrázku 56. Při zatížení 25% F_{\max} se průměrná hodnota pohybovala okolo 116 000 cyklů.

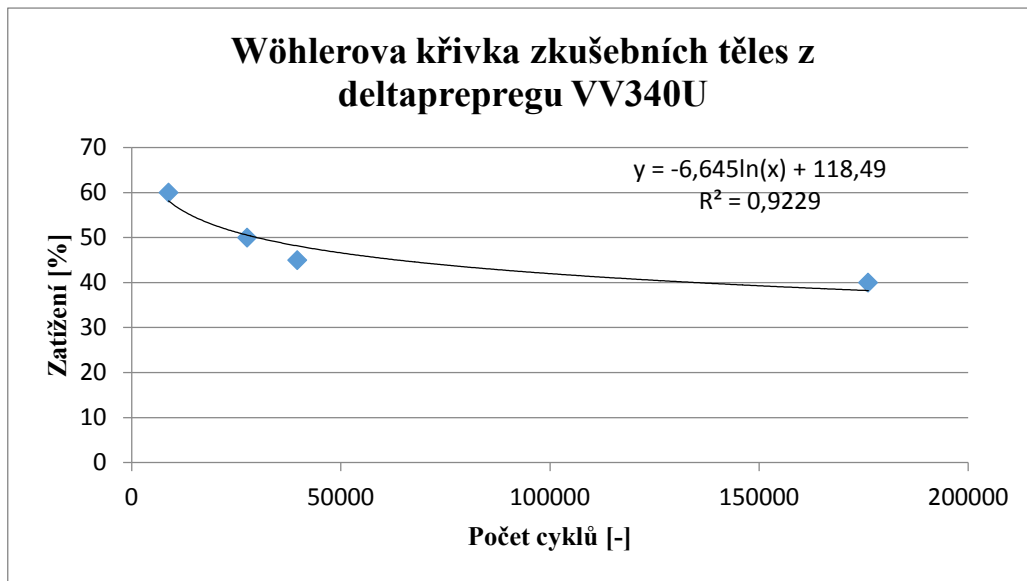
7.5 Zkušební tělesa deltapregu VV340U

Tabulka 23 Výsledky dynamické zkoušky těles deltapregu VV340U

Deltapreg VV340U	Počet cyklů				
	$F_{\max}=21200\text{ N}$	60% F_{\max}	50% F_{\max}	45% F_{\max}	40 F_{\max}
1.1		6236	26333	38844	113500
1.2		5399	32331	45210	213241
1.3		11312	17929	25317	232451
1.4		10518	36672	28393	115368
1.5		6044	24508	30270	221735
1.6		9804	33839	24293	160076
1.7		11738	20838	56335	x
1.8		9648	28458	68189	x
\bar{x}		8837	27613	39600	176061
s		2380	6070	14918	49161



Obrázek 58 Graf průměrných hodnot cyklů těles deltapregu VV340U



Obrázek 59 Wöhlerova křivka těles deltapregu VV430U

Zkušební tělesa ze deltapregu VV430U vydržely vysoké počty zatěžujících cyklů. Zkušební tělesa vyrobené z prepregů mají vysoký podíl vláknové výztuže a díky tomu dosahují výborných mechanických vlastností. Rovnoměrné prosycení vláken zlepšuje odolnost vůči únavě. Při 40% dosahuje průměrná hodnota 176 000 cyklů, je zde ale také větší směrodatná odchylka, když rozdíl nejmenšího a nejvyššího počtu cyklů je kolem 120 000 cyklů.



Obrázek 60 Zkušební těleso deltapregu po porušení



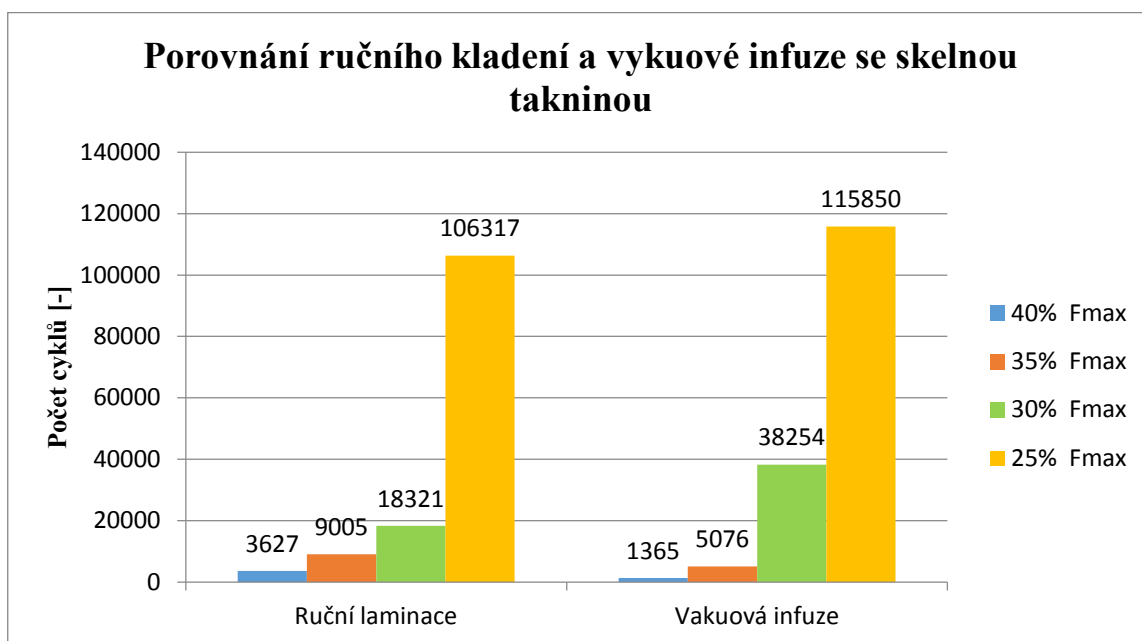
Obrázek 61 Zkušební těleso deltapregu po dynamické zkoušce

8 VYHODNOCENÍ A POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT

Mezi počty cyklů zkušebních těles z uhlíkových tkanin, skelné tkanin a prepregu byly značné rozdíly. Zkušební tělesa ze skelné tkaniny mohla být zkoušena od 40% zatížení níže, stejně to bylo i u zkušebních těles vyrobených metodou vakuové infuze. Uhlíková tkanina mohla být zkoušena od hladiny 70% maximálního zatížení a zkušební tělesa z prepregu od 60%. Z tohoto důvodu nemohli být zkoušeny všechny 4 technologie při stejných hladinách zatížení.

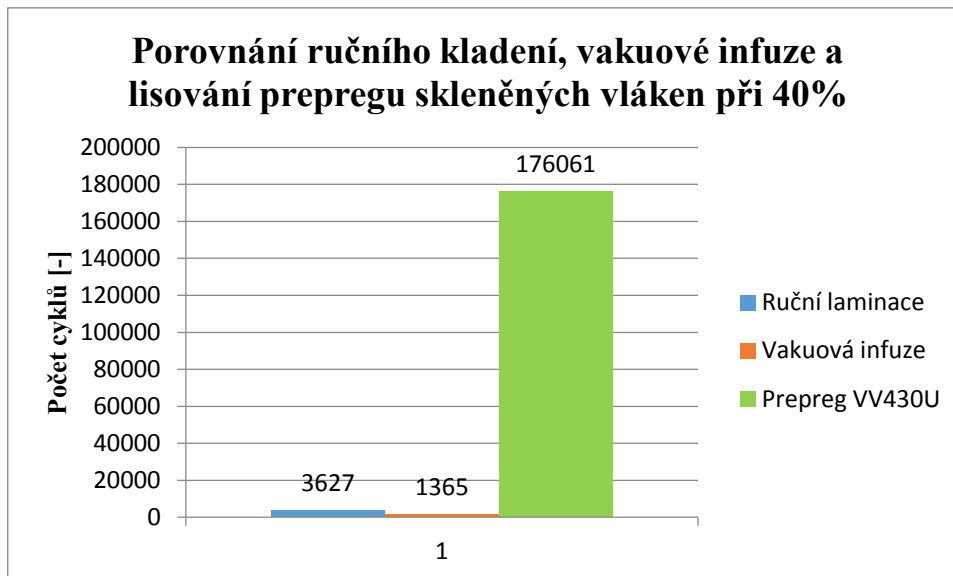
8.1 Skelná tkanina

Zkušební tělesa se skelnými vlákny byly použity u metod ručního kladení, vakuové infuze a lisování prepregu. Nejlepší vlastnosti dosahují tělesa vyrobená metodou lisování prepregu.



Obrázek 62 Srovnání počtu cyklů ruční laminace a vakuová infuze

Při zatížení 40% a 35% F_{max} vydržely větší počty cyklů zkušební tělesa vyrobená metodou ručního kladení, při zatížení 30% a 25% F_{max} vydržely větší počet cyklů zkušební tělesa vyrobeny metodou vakuové infuze. Nižší počet cyklů testovaných těles vakuové infuze pravděpodobně způsobila chyba při výrobě. Tělesa zhotovené metodou vakuové infuze měly dosahovat větších počtů cyklů, než dosáhly.

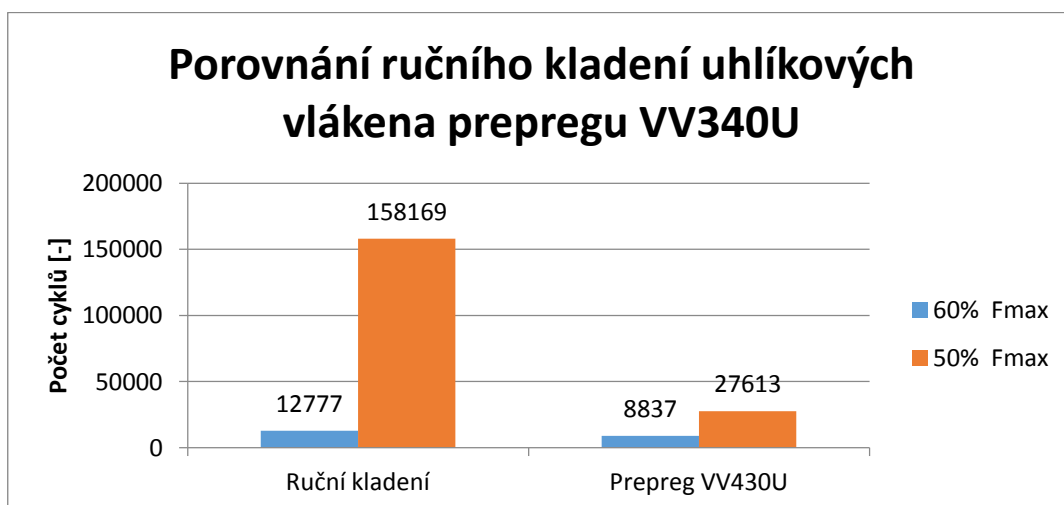


Obrázek 63 Porovnání výrob se skleněnými vlákny

Porovnání při zatížení 40% F_{max} výrobních metod ruční laminace vakuové infuze a lisování prepregu se skleněnými vlákny. Nejlepší výsledky se značným rozdílem jsou u lisování prepregů. Metody ruční laminace a vakuové infuze dosahují vyšších počtu cyklů až při nižších zatíženích.

8.2 Lisování prepregu a ruční laminace uhlíkové tkaniny

Zkušební tělesa vyrobené metodou ruční laminace uhlíkových vláken dosahovaly nejlepších výsledků. Měly lepší výsledky než tělesa lisované z prepregu. Tento rozdíl je způsoben lepšími mechanickými vlastnostmi uhlíkových vláken.



Obrázek 64 Srovnání počtu cyklů ručního kladení a lisování prepregu

Pro porovnání by bylo vhodné srovnat data i při zatížení 40% F_{\max} , ale z důvodu časového toto porovnání nebylo možné naměřit, vzorky by dosahovaly velkých počtů cyklů. Při 60% F_{\max} není rozdíl v počtu cyklů velký, rozdíl průměrných hodnot je 3940 cyklů. Při 50% F_{\max} je zde značný rozdíl nárůstu počtu cyklů u zkušebních těles vyrobených metodou ručního kladení. Rozdíl se vyšplhal až na 130 000 cyklů. Nárůst cyklů u těles vyrobených z prepregů je až při zatížení 40% F_{\max} . Při tomto zatížení dosahuje průměrná hodnota cyklů 176 000.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo zjistit vliv použité výrobní technologie na únavovou životnost kompozitních materiálů. Byly porovnávány výrobní technologie ručního kladení, vakuové infuze a lisování prepregů. Byla porovnávána zkušební tělesa ze skleněných vláken. Pro porovnání byly metodou ručního kladení vyrobeny i zkušební tělesa z uhlíkových vláken. Při měření bylo zjištěno, že zkušební tělesa vyrobená metodou ručního kladení, se při měření zahřívají, proto byla tělesa dána na vytvrzení a poté výsledky porovnány s tělesy nevytvrzenými.

Nejprve byla provedena statická tahová zkouška pro získání základních materiálových vlastností cyklicky nezatížených těles. Extenzometr byl využit jen u pár měření, poté už nebyl k dispozici. Na maximální sílu F_{max} , která pro nás je důležitá, to nemá vliv. Z maximální síly F_{max} poté byly vypočítány hodnoty zatěžujících hladin. Všechny výrobní metody měly být měřeny na stejných hladinách zatížení. Zkušební vzorky vyrobené ručním kladením ze skleněných vláken a tělesa vyrobená vakuovou infuzí mohly být měřeny při nejvyšším zatížení 40% F_{max} . Tělesa vyrobená z uhlíkových vláken mohla být zkoušena při maximálním zatížení 70% F_{max} . Nejvyšší hladina zatížení zkušebních těles vyrobených z prepregu byla při 60%. Z důvodu velké časové náročnosti nebylo možné začínat všech metod na 40% zatížení. Proto porovnávání výsledků bylo složitější.

Nejlepší výsledky vykazovaly zkušební tělesa vyrobená metodou ručního kladení s uhlíkovými vlákny, která vydržela při zatížení 50% F_{max} 158 000 cyklů. Tento výsledek není vliv výrobní technologie, ale je to zapříčiněno mechanickými vlastnostmi uhlíkových vláken, které jsou lepší než u skleněných vláken. Nejlepších výsledků zkušebních těles se skleněnými vlákny dosahovaly tělesa vyrobená lisováním prepregu. Při zatížení 40% F_{max} je průměrný počet cyklů 176 000. V porovnání s metodami ručního kladení a vakuové infuze je to velký rozdíl, jejich výsledky při tomto zatížení byly 3627 a 1335 cyklů. Při zatíženích 40% a 35% F_{max} byly lepší výsledky u metody ručního kladení. Při zatížení 30% a 25% F_{max} byly lepší výsledky u metody vakuové infuze. Jejich výsledky se nelišily o tolik. Při zatížení 25% byly výsledky průměrných hodnot u těles ručního kladení 106 000 cyklů a u metody vakuové infuze 115 000 cyklů. Předpoklad byl, že tělesa vyrobená metodou vakuové infuze budou mít lepší výsledky. Na tělesech bylo vidět nedostatečné prosycení, což zapříčinila chyba ve výrobě. Z toho plyne, že únavová životnost je také velmi závislá na kvalitě výroby, zkušenostech pracovníka, který dané technologie vykonává.

Porovnáním vytvrzených na nevytvrzených zkušebních těles bylo zjištěno, že odolnější jsou tělesa vytvrzená. Nevytvrzená zkušební tělesa se při cyklických zatíženích zahřívaly, měkly a jejich výsledky byly nestálé a nižší než u těles vytvrzených. Rozdíl se nejvíce projevovaly u nižších zatížení. U těles s uhlíkovými vlákny byl rozdíl větší, než u těles se skleněnými vlákny. Při zatížení 50% F_{\max} byl rozdíl 145 000 cyklů. U skleněných vláken byl rozdíl 67 000 cyklů. Teplo vznikající při cyklickém zatížení má značný vliv na životnost kompozitních materiálů.

Vliv na kompozitní materiály mají nejen metody, kterými jsou zhotovovány, ale také velký podíl na jejich životnosti mají pracovníci zkušenosti s výrobou a výrobními postupy. Podstatné je také, z jakých materiálů jsou kompozitní materiály vyráběny. Pro náročnější aplikace, kde jsou požadavky na vyšší počty cyklů při vyšších zatíženích, je vhodné použít kompozity s uhlíkovými vlákny, nebo kompozity vyrobené lisováním prepregů, které se jeví jako výrobní postup nejlépe odolávající únavě.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [3] LAPČÍK, Lubomír a Miroslav RAAB. *Nauka o materiálech II*. Vyd. 2., rozš. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2004. ISBN 80-7318-229-7
- [4] SIGMUND, Ota. *Výzkum matric pro pre-preg aplikace*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2017, 110 stran DP, 38 stran přílohy. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/40666>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Rusnáková, Soňa.
- [5] SKOČOVSKÝ, Petr. *Nové konstrukční materiály: vybrané kapitoly*. Žilina: Vysoká škola dopravy a spojov, 1995. ISBN 807100264x.
- [6] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. 1.vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. 328 s
- [7] RŮŽIČKA, Milan a Jiří FIDRANSKÝ. *Pevnost a životnost letadel*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000, 206 s. ISBN 80-01-02254-4.
- [8] VOJTĚCH, Dalibor. *Materiály a jejich mezní stavy*. Vyd. 1. V Praze: Vysoká škola chemicko-technologická, 2010, 204 s. ISBN 9788070807415.
- [9] KRÁL, Michal. *Únava vlákný vyztužených kompozitů s polymerní maticí* [online]. Praha, 2014 [cit. 2019-05-14]. Prezentace. Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s. Útvar kompozitní technologie. Dostupné z:http://www.csm-kompozity.wz.cz/Prezentace_UTAM.pdf
- [10] Mechanické vlastnosti polymerů – dynamické únavové namáhání. *Polymery* [online]. Publi.cz – platforma promultimediálníneBookynebolimKnihy [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/10.html>
- [11] Únava materiálu, únavový lom. In: *Slide server* [online]. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://www.slideserve.com/bette/navo-materi-lu-navov-lom>
- [12] HARRIS, Bryan. *Fatigue in composites: science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics*. Boca Raton: CRC Press, 2003, xxi, 742 p. ISBN 185573608x.
- [13] VASSILOPOULOS, Anastasios P. *Fatigue life prediction of composites and composite structures: edited by Anastasios P. Vassilopoulos*. Oxford: Woodhead Publishing, 2010. Woodhead Publishing in materials. ISBN 1439827893

- [14] Ruční kladení. In: *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/en/clanky/vyroba-rotoroveho-listu-vetrne-elektrarny/315#prettyPhoto>
- [15] KOŘÍNEK Z., Kompozity, [online]. [cit. 2019-05-014], dostupné:<http://kompozity.webnode.cz/>
- [16] ENDER Š., *Technológie výroby kompozitov*, TUVK ST, 2016, [online]. [cit. 2019-05-14], dostupné:<https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/33-2016/pdf/188-191.pdf>
- [17] FOJTL, L. Vliv materiálového složení a tvaru na vybrané fyzikální vlastnosti sendvičových konstrukcí. Zlín, 2016. Disertační práce. UTB ve Zlíně. Školitel disertační práce Soňa Rusnáková.
- [18] Hexply Prepreg technology. In: *Hexcel* [online]. Hexcel Corporation, 2013 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mavt/design-materials-fabrication/composite-materials-dam/Education/Manufacturing_of_Polymer_Composites/FS2017/Prepreg_Technology.pdf
- [19] *Huntsman: Prepregs* [online]. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: https://www.huntsman.com/advanced_materials/a/Our%20Technologies/Ready%20to%20Use%20Formulated%20Systems/Composites/Prepregs?p_langswitch=1
- [20] Semipregy. *5M CZ* [online]. Kunovice [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://www.5m.cz/produkty/semipreg>
- [21] COMPOSIT FABRICATION METHOD [On-line]. [Cit. 2019-05-14] Dostupné z: <http://abdmatrix.com/site/openrepository/files/Composite%20Fabrication%20Method.pdf>
- [22] Prepreg technologie. In: *FORM s.r.o.* [online]. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <http://www.form-composite.com/prepreg>
- [23] MANUFACTURING PROCESSES, *Prepregs* [On-line]. [Cit. 2019-05-14] Dostupné z: <http://www.fisica.unige.it/~rocca/Didattica/Material%20Science/SERP%2013%20-%20COMPOSITE%20PREPREGS%2009-12-13.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

E	Modul pružnosti
Mpa	Význam třetí zkratky.
mm	Milimetr
μm	Mikrometr
m	Metr
g	Gram
kg	Kilogram
g/m ²	Gram na metr čtverečný
F _{max}	Maximální síla
σ _{Mt}	Mez pevnosti v tahu
ε	Poměrná deformace prodloužení
W _{Fmax}	Deformační práce
a	Výška
b	Šířka
L	Délka
t	Čas
h	Hodina
N	Newton
kN	Kilonewton
Hz	Hertz
UP-R	Nenasycené polyesterové pryskyřice
VE-R	Vinylesterové pryskyřice
EP-R	Epoxidové pryskyřice
PF-R	Fenolické pryskyřice

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Graf vlastností složek kompozitů [4]	12
Obrázek 2 Druhy tkaninových vazeb [2]	14
Obrázek 3 Struktura skleněného vlákna [1]	15
Obrázek 4 Vliv skleněných vláken na vlastnosti kompozitu [1]	16
Obrázek 5 Uhlíkové tkaniny [5]	17
Obrázek 6 Průběh poškozování homogenních a vláknitých materiálů [1]	20
Obrázek 7 Poškození během života kompozitního zkoušeného tělesa [1]	20
Obrázek 8 Únavové vlastnosti kompozitu s epoxidovou pryskyřicí a různými druhy vláken [1]	21
Obrázek 9 Oblasti cyklického zatěžování [10]	22
Obrázek 10 Průběhy zatěžovací křivky [13]	23
Obrázek 11 Pokles tuhosti jako kritérium únavy (epoxidová pryskyřice vyztužená uhlíkovými vlákny) [1]	24
Obrázek 12 Charakteristika opakovaného cyklu zatížení [11]	24
Obrázek 13 Zkušební těleso zkoušky EN ISO 13003 [12]	25
Obrázek 14 Schéma výrobní metody ruční kladení [14]	27
Obrázek 15 Schéma metody odsávání vzduchu pomocí vakuového vaku [2]	28
Obrázek 16 Metoda vakuové infuze [17]	29
Obrázek 17 Prepregy [18]	30
Obrázek 18 Výrobní proces prepregu a) jednosměrného vlákna, b) tkaniny [22]	32
Obrázek 19 Rozpouštědlový způsob výroby [21]	34
Obrázek 20 Metoda výroby prepregu pomocí horké taveniny [21]	35
Obrázek 21 Separátor PVA a separační vosk	37
Obrázek 22 Stříhání uhlíkové tkaniny	38
Obrázek 23 Smíchání epoxidové pryskyřice a tužidla	38
Obrázek 24 Deska vyrobená metodou ručního kladení	39
Obrázek 25 Postup výroby vakuové infuze	40
Obrázek 26 Nasávání a rozvádění pryskyřice	41
Obrázek 27 Kompozitní deska se skleněnou výztuží vyrobená vakuovou infuzí	41
Obrázek 28 Odnímání ochranné folie a kladení první vrstvy	42
Obrázek 29 Lis Mitas	42
Obrázek 30 Kompozit vyrobený z prepregu	43

Obrázek 31 Zkušební tělesa ze skleněných vláken.....	44
Obrázek 32 Zkušební tělesa z uhlíkových vláken	44
Obrázek 33 Zkušební tělesa vyrobené vakuovou infuzí.....	45
Obrázek 34 Zkušební tělesa vyrobené z prepregu VV430U	46
Obrázek 35 Průběh vytvrzování zkušebních těles	46
Obrázek 36 Vestavěná trouba Fagor.....	47
Obrázek 37 ZWICK / ROELL vibrophore 100	49
Obrázek 38 Graf závislosti napětí na poměrné deformaci.....	51
Obrázek 39 Graf závislosti napětí na poměrné deformaci uhlíkových zkušebních těles.....	53
Obrázek 40 Graf závislosti napětí na poměrné deformaci.....	54
Obrázek 41 Graf závislosti napětí na poměrné deformaci u těles vakuové infuze.....	56
Obrázek 42 Porovnání maximální síly F_{max}	57
Obrázek 43 Porovnání meze pevnosti	57
Obrázek 44 Sinusový průběh zatížení	58
Obrázek 45 Graf průměrných hodnot cyklů uhlíkových vytvrzených těles	61
Obrázek 46 Wöhlerova křivka těles s vytvrzenými uhlíkovými vlákny	61
Obrázek 47 Graf průměrných hodnot cyklů uhlíkových nevytvrzených těles	63
Obrázek 48 Wöhlerova křivka těles s nevytvrzenými uhlíkovými vlákny.....	63
Obrázek 49 Porovnání počtu cyklů vytvrzených a nevytvrzených zkušebních těles s uhlíkovými vlákny	64
Obrázek 50 Graf průměrných hodnot cyklů skleněných vytvrzených těles	65
Obrázek 51 Wöhlerova křivka těles s vytvrzenými skleněnými vlákny	66
Obrázek 52 Zkušební těleso ze skleněné tkaniny po dynamické zkoušce.....	66
Obrázek 53 Graf průměrných hodnot cyklů skleněných nevytvrzených těles	67
Obrázek 54 Wöhlerova křivka těles s vytvrzenými neskleněnými vlákny.....	68
Obrázek 55 Porovnání vytvrzených a nevytvrzených těles se skleněnými vlákny	69
Obrázek 56 Graf průměrných hodnot cyklů těles vakuové infuze	70
Obrázek 57 Wöhlerova křivka vakuové infuze	71
Obrázek 58 Graf průměrných hodnot cyklů těles deltapregu VV430U	72
Obrázek 59 Wöhlerova křivka těles deltapregu VV430U.....	73
Obrázek 60 Zkušební těleso deltapregu po porušení.....	73
Obrázek 61 Zkušební těleso deltapregu po dynamické zkoušce	74

Obrázek 62 Srovnání počtu cyklů ruční laminace a vakuová infuze.....	75
Obrázek 63 Porovnání výroby se skleněnými vlákny	76
Obrázek 64 Srovnání počtu cyklů ručního kladení a lisování prepregu	76

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Porovnání hustoty a mechanických vlastností vláken [1].....	13
Tabulka 2 Složení skloviny a její vlastnosti [2].....	15
Tabulka 3 Porovnání výrobních procesů B-stavu [19]	33
Tabulka 4 Rozměry zkušebních těles se skleněnými vlákny.....	43
Tabulka 5 Rozměry zkušebních těles s uhlíkovými vlákny	44
Tabulka 6 Rozměry zkušebních těles vyrobených vakuovou infuzí	45
Tabulka 7 Rozměry zkušebních těles z deltapregu VV430U	45
Tabulka 8 Parametry vestavěné trouby Fagor	47
Tabulka 9 Nastavené hodnoty měření na stroji	48
Tabulka 10 Hodnoty statické zkoušky zkušebních těles ze skleněných vláken	50
Tabulka 11 Hodnoty statické zkoušky zkušebních těles z uhlíkových vláken	52
Tabulka 12 Hodnoty statické zkoušky zkušebních těles z deltapregu VV340U	54
Tabulka 13 Hodnoty statické zkoušky zkušebních těles vyrobených vakuovou infuzí	55
Tabulka 14 Parametry zkušebních těles s uhlíkovými vlákny.....	59
Tabulka 15 Parametry zkušebních těles se sklěněnými vlákny	59
Tabulka 16 Parametry zkušebních těles vyrobených vakuovou infuzí.....	59
Tabulka 17 Parametry zkušebních těles deltaprepeg VV430U	60
Tabulka 18 Výsledky dynamické zkoušky uhlíkových těles vytvrzených	60
Tabulka 19 Výsledky dynamické zkoušky uhlíkových těles nevytvrzených	62
Tabulka 20 Výsledky dynamické zkoušky skleněných těles vytvrzených	65
Tabulka 21 Výsledky dynamické zkoušky skleněných těles nevytvrzených	67
Tabulka 22 Výsledky dynamické zkoušky těles vyrobených vakuovou infuzí.....	70
Tabulka 23 Výsledky dynamické zkoušky těles deltapregu VV430U	72

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha I: Jednosměrný deltapreg VV340U 34% příloha
- Příloha II: Uhlíková tkanina KORDCARBON CC200 T4-160
- Příloha III: Skelná tkanina aeroglass 280g/m²
- Příloha IV: Matrice Havel L285, Tužidlo 285 viz příloha
- Příloha V Separáčn  vosk Oskars

PŘÍLOHA P I: TECHNICKÝ LIST UD DELTAPREPREG 34%

VV340U



SCHEDA TECNICA DI PRODOTTO/PRODUCT TECHNICAL DATA SHEET

Codice Articolo/ Material code: A-PRO1328

Rev. 1.02 - 09/10/2014

VV430U-DT806W-39 VV430U (H 124 cm)

Caratteristiche del sistema resinoso/ Features of the resin matrix: (*)

Natura del formulato/ Chemical nature	Epossidico termoidurente/ Thermosetting epoxy
Temperatura di cura/ Cure temperature	65 ÷ 140°C
Gel time	50 ÷ 60 min @ 80°C 15 ÷ 19 min @ 100°C
Tg [Ciclo di cura]/ Tg [Cure cycle]	Ref. to DT806 technical data sheet (1)
Viscosità/ Viscosity	Bassa/ Low (2)
Trasparenza/ Transparency	Molto buona/ Very good
Stabilità all'ingiallimento/ UV stability	N.A. (vedi Trasparenza)/ N.A. (see Transparency)
Indicato per applicazioni dove siano richiesti:/ Recommended for those applications requiring:	-Indurimento a bassa temperatura/ Low temperature cure -Stampaggio rapido in pressa/ Fast press molding -Elevati requisiti estetici/ Good surface quality

(1) Misurata con DSC alla velocità di scansione di 20°C/min / Measured by DSC @ 20°C/min

(2) Viscosità complessa misurata a 60°C minore di 300 Poise (frequenza 10 rad/sec)/ Complex viscosity < 300 Poise @ 60°C (frequency 10 rad/sec)

Caratteristiche del tessuto impregnato/ Features of the impregnated fabric:

Tipo di filato (Ordito; Trama)/ Yarn type (Warp; Weft)	EC9 5x136 tex; EC9 68 tex
Stile di tessitura/ Weaving style	Tela/ Plain
Larghezza standard/ Standard width	1240 ± 5 mm (esclusa cimosa/ without selvedge)
Lunghezza standard/ Standard length	55 ± 0 m
Ordito (fili/ cm)/ Warp (ends/ cm)	5,50 ± 0,20
Trama (fili/ cm)/ Weft (picks/ cm)	6,30 ± 0,30
Peso areale fibra secca/ FAW	425 ± 20 g/m ²
Contenuto di resina/ Resin content	39 ± 3 % in peso/ by weight
Contenuto di volatili/ Volatile content	<1,0 % in peso/ by weight (3)
Spessore lamina/ Laminate thickness	0,660 mm (4)
Conservazione/ Shelf life	3 settimane @ 21°C/ 3 weeks @ 21°C 12 mesi @ -18°C/ 12 months @ -18°C

(3) Perdita in peso dopo 15 min in forno ventilato a 160°C/ Weight loss after 15 min in oven @ 160°C

(4) Valore indicativo, può variare in funzione dell'eventuale fuoriuscita di resina dal laminato e dalla porosità residua/ This value depends on eventual resin bleed out and/or residual porosity in the cured laminate

(*) Per maggiori dettagli riferirsi alla corrispondente matrix TDS/ For additional information please refer to the appropriate matrix TDS

Documento soggetto a eventuali aggiornamenti senza obbligo di comunicazione immediata/
This document may be subject to change without prior notice

PŘÍLOHA PII: TECHNICKÝ LIST KORDCARBON CC200 T4-100



Inspection Certificate 3.1

EN 10 204: 2004

Certificate No.: C0045101

Material Code: TOR000901
Material Designation: CC 200 T - 120
Manufacturing Date: 27.3.2014
Article no.: CA0011-641-0001
Test roll No.: C0045101
Finish: loomstate

Kind of material - warp: Toray 3K 200 tex
Kind of material - weft: Toray 3K 200 tex
Compatibility: Epoxi resin
Binding: twill 2/2

Results of specific tests according to Specification No.: TOR000901						
Characteristic	Unit	Target values	Tolerance (min. - max.)		Test results	Note
Sett of warp	n/m	500	495	505	* 500	DIN EN 1049-2
Sett of weft	n/m	500	495	505	* 500	DIN EN 1049-2
Thickness	mm	0,32	0,29	0,35	* 0,39	DIN EN 5084
Area weight	g/m ²	200	200	205	200	DIN EN 12127
Width	cm	120	119,5	121	* 120,6	DIN EN 1773
Density	g/cm ³	1,76				

* orientation value

Corresponds to the batch no.: C00451



Address of Manufacturer:
KORDARNA Plus a.s.
888 74 Velká nad Veličkou 880
Czech Republic

Contact of Techn. Dept.: Kučera Jiří, +420 518 312 528
+ 420 518 329 302, kuceraj@kordarna.cz

PŘÍLOHA PIII : SKELNÁ TKANINA AEROGLASS



Technický list

Skelná tkanina 280 g/m²

AEROGLASS

Plátano

Váha na jednotku plochy		280 g/m ² +/- 15 g
Vazba		plátano
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., Svěsedlice 67, Přáslavice, 783 54

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

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

PŘÍLOHA PIV: TECHNICKÝ LIST

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 nářadí, 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: fixotropní L 285 K2: fixotropní 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 nejružnější plniva, např. aerosil, mikrobalony, 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

	Pryskyňce 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		GRC Skelné vlákno GFK	CRC Uhlík. vlákno CFK	SRC Kevlar.vlákno SFK
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 stříhu 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			
GRC vzorky: 16 vrstev skelné tkaniny, 8 H satén, 296 g/m ² , 4 mm silné CRC vzorky: 8 vrstev uhlíkové tkaniny, plátno, 200 g/m ² , 2 mm silné SRC vzorky: 15 vrstev kevlarové tkaniny, 4H satén, 170 g/m ² , 4 mm silné				
Obsah vláken ve vzorcích během výroby/testování: 40 - 45 vol% Data propočítaná na obsah vláken 43 vol%				
Typická data dle WL 5.3203 Části 1 a 2 Manuálu o německých leteckých materiálech.				

Michací 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. 90 %	10 %	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:	Extrémně 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. Laminační 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.

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 salající 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 váhové	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
Tvrdość D	ve střihu	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 PV : TECHNICKÝ LIST SEPARAČNÍHO VOSKU

Technical Bulletin

Wachsfabrik Segeberg GmbH

01-2005

Oskar's M-700

Product name: Oskar's M-700 Mould Release Paste Wax

General: M-700 is a solid emulsion of pure Carnauba wax in hydrocarbon solvents and water. At normal work in the mould it forms a very hard and resistant coat in order to delay the formation of styrene/wax residues (wax-built-up) and to avoid pre-release causing high costs of working over. M-700 is free from silicone.
The basic layer of M-700 is maintained by M-500.

Composition: M-700 contains Carnauba wax, petroleum-distillate, a emulsifier and water. M-700 does not contain morpholine, turpentine or silicone.

Appearance:	solid wax paste
Colour:	yellow up to gray-brownish
Odour:	nearly odourless
Specific Gravity:	- 0.88 g/ml at 20 °C
pH-value:	not applicable
Flashpoint °C:	>65 °C
Ignition Temperature °C:	> 300
Explosion Limits:	0.6 – 8.5 Vol.-% (solvents)
Solubility:	partly in hydrocarbons, insoluble in water

Packaging: tins a' 425 gr. – cartons a' 12 tins

Storage: M-700 has a shelf life of at least 24 month if stored in its original, unopened containers in a dry and cool place. Avoid freezing and prolonged temperatures above 30 °C (86 °F).

Comments: M-700 is one component of OSKAR'S MOULD RELEASE AND MAINTENANCE SYSTEM. More detailed information regarding this system can be supplied upon request. This documentation describes the application of M-700 as well as the other parts of this system.

The data given above are based on current knowledge and experience. The data do not signify any warranty.