

# Faktory ovlivňující únavovou životnost konstrukčních kompozitů

Bc. Zbyněk Krejčířík

---

Diplomová práce  
2020

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	<b>Bc. Zbyněk Krejčířík</b>
Osobní číslo:	<b>T18707</b>
Studijní program:	<b>N3909 Procesní inženýrství</b>
Studijní obor:	<b>Konstrukce technologických zařízení</b>
Forma studia:	<b>Prezenční</b>
Téma práce:	<b>Faktory ovlivňující únavovou životnost konstrukčních kompozitů</b>

### Zásady pro vypracování

1. Vypracování lit.rešerše pro danou problematiku
2. Výroba zkušebních těles a jejich kondicionace
3. Provedení únavových zkoušek
4. Vyhodnocení výsledků z hlediska konstrukčních aplikací

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

**Seznam doporučené literatury:**

1. KRÁL, M.:Únava vláknny vyztužených kompozitů s polymerní maticí [online]. Praha, 2014 [cit. 2016-04-28]. Prezentace. Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s. Útvar kompozitní technologie. Dostupné z:[http://www.csm-kompozity.wz.cz/Prezentace\\_UTAM.pdf](http://www.csm-kompozity.wz.cz/Prezentace_UTAM.pdf)
2. Růžička, M., Hanke, M. a Rost, M.: Dynamická pevnost a životnost. Praha: Nakladatelství ČVUT, 1987, 212 s.
3. RŮŽICKA, 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 2020**  
Termín odevzdání diplomové práce: **15. května 2020**

L.S.

---

**prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.**  
děkan

---

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

Ve Zlíně dne 15. dubna 2020

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou 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;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užit své dílo – diplomovou 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);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové 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.

**Prohlašuji,**

- že jsem diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce pojednává o únavovém chování konstrukčních kompozitů a faktorům, které ovlivňují jak mechanické, tak dynamické vlastnosti těchto materiálů. Teoretická část je především zaměřena na obecný popis jednotlivých složek kompozitních materiálů, únavovém chování a způsobu, jak jej lze měřit. V poslední kapitole je rozebrána problematika faktorů, které toto chování ovlivňuje. V praktické části jsou popsány experimentální zjištění mechanických a dynamických vlastností na jednotlivých typech zkušebních vzorků. Mechanické vlastnosti byly analyzovány zkouškou v tahu, dynamická zkouška pak probíhala také v tahu.

Klíčová slova: polymery, kompozity, prepreg, únava kompozitních materiálů, dynamické namáhání, UD Deltapreg VV430U,

## **ABSTRACT**

The diploma thesis deals with fatigue behavior of structural composites and factors that influence mechanical and dynamic properties of these materials. The theoretical part is mainly focused on the general description and individual components of composite materials, stress behavior and the way it can be measured. In the last chapter is discussed the issues of factors influencing this behavior. The practical part then describes the experimental determination of mechanical and dynamic properties on individual types of test samples. The mechanical properties were analyzed by tensile test, and the dynamic test was tensile.

Keywords: polymers, composites, prepreg, fatigue of composite materials, dynamic stress, UD Deltapreg VV430U

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu mé práce Ing. Milanu Žaludkovi Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, trpělivost, ochotu a vynaložený čas, který mi věnoval po dobu tvorby této diplomové práce. Taktéž bych chtěl poděkovat Ing. Alexanderu Čapkovi při pomoci a realizaci únavových zkoušek. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině a nejbližším za jejich podporu a pomoc v průběhu celého studia.

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 HISTORICKÝ POKROK A UPLATNĚNÍ V PRŮMYSLVÝCH ODVĚTVÍCH .....	14
1.2 ROZDĚLENÍ KOMPOZITŮ .....	14
1.3 MATRICE .....	15
1.3.1 Reaktoplasty .....	17
1.3.1.1 Epoxidové pryskyřice .....	17
1.3.1.2 Polyesterové pryskyřice .....	18
1.3.1.3 Fenolové pryskyřice.....	19
1.3.1.4 Vinylesterové pryskyřice .....	19
1.3.1.5 Technologie Prepreg .....	19
1.3.2 Termoplasty.....	20
1.3.2.1 PEEK .....	21
1.3.2.2 PEAK.....	21
1.3.3 Kovy.....	21
1.3.4 Keramika .....	22
1.4 VÝZTUŽ.....	22
1.4.1 Skelná vlákna .....	24
1.4.2 Uhlíková vlákna .....	25
1.4.3 Aramidová vlákna .....	27
1.4.4 Bórová vlákna .....	27
1.4.5 Ostatní .....	28
1.5 MECHANICKÉ VLASTNOSTI KOMPOZITŮ .....	28
1.5.1 Druhy zkoušek mechanických vlastností .....	29
2 ÚNAVA MATERIÁLU.....	30
2.1 ÚNAVOVÉ POŠKOZENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....	31
2.1.1 Fáze poškození .....	31
2.2 ÚNAVOVÁ ZKOUŠKA .....	33
2.2.1 Typy zatížení .....	33
2.2.2 Frekvence při zkoušce .....	34
2.2.3 Průběh zatěžování .....	34
2.3 KŘIVKY ÚNAVOVÉHO ZATĚŽOVÁNÍ.....	35
2.3.1 Křivka životnosti $\epsilon A - Nf$ .....	35
2.3.2 Wöhlerova křivka.....	36
2.3.2.1 Zatěžovací cyklus .....	37
2.3.2.2 Oblasti Wöhlerovy křivky .....	37
3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ÚNAVOVÉ CHOVÁNÍ A ŽIVOTNOST.....	39
3.1 VLIV SKLÁDÁNÍ VRSTEV .....	39
3.2 DEGRADAČNÍ PROCESY .....	42
3.2.1 Termodegradace .....	42
3.2.2 Fotodegradace .....	43



3.2.3	Mechanická degradace .....	43
3.2.4	Změny nadmolekulární struktury .....	43
3.2.5	Biodegradace .....	44
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>		<b>45</b>
<b>4</b>	<b>VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES .....</b>	<b>46</b>
4.1	POSTUP VÝROBY .....	46
4.1.1	Příprava před lisováním .....	46
4.1.2	Podmínky při lisování .....	48
4.2	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES K MĚŘENÍ .....	48
4.2.1	Použitý materiál .....	49
4.2.2	Modifikace vrstvení prepregů .....	49
4.2.2.1	Vzorek č.1 .....	49
4.2.2.2	Vzorek č.2 .....	49
4.2.2.3	Vzorek č.3 .....	50
4.2.3	Řezání zkušebních těles .....	50
4.2.3.1	Řezání materiálu vysokotlakým vodním paprskem .....	50
<b>5</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ZJIŠTĚNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ .....</b>	<b>52</b>
5.1	STATICÁ ZKOUŠKA TAHEM .....	52
5.1.1	Vzorek č.1 .....	53
5.1.2	Vzorek č.2 .....	55
5.1.3	Vzorek č.3 .....	57
5.2	POROVNÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ VZORKŮ Č. 1, Č. 2 A VZORKŮ Č.3 .....	59
5.3	SHRnutí MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ V TAHU .....	61
<b>6</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ZJIŠTĚNÍ DYNAMICKÉHO NAMÁHÁNÍ .....</b>	<b>62</b>
6.1	PARAMETRY ZKOUŠKY .....	62
6.2	DYNAMICKÁ ZKOUŠKA TAHEM .....	63
6.2.1	Vzorek č.1 .....	63
6.2.2	Vzorek č.2 .....	64
6.2.3	Vzorek č.3 .....	65
6.3	POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ .....	66
6.4	SHRnutí DYNAMICKÝCH VLASTNOSTÍ V TAHU .....	68
<b>ZÁVĚR .....</b>		<b>69</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>		<b>71</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>		<b>75</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>		<b>77</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>		<b>79</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>		<b>80</b>

## ÚVOD

Rychlý a dynamicky rozvíjející se strojný průmysl se v posledních letech zaměřuje především na rozvoj výroby a zpracování plastů, a tak předstihuje rozvoj většiny jiných oborů. Mezi typy zpracování polymerů určitě najdeme výrobu kompozitních materiálů, což je systém složek, který je vzájemně propojen. Tímto propojením získává výsledný výrobek daleko lepší vlastnosti, které by samotné složky nebyly nikdy schopny dosáhnout. Díky vlastnostem, jako jsou velká pevnost na poměry jeho plošné hmotnosti, tepelné odolnosti, tlumení rázů ale i dielektrickým vlastnostem je kompozitní materiál velmi rozšířen v průmyslových odvětvích, mezi které patří průmysl automobilový, lodní a především letecký.

Hlavním aspektem této diplomové práce je studium únavového chování kompozitního materiálu a jeho vlastnostech při dynamickém zatížení v praxi. V teoretické části je vysvětleno rozdělení kompozitních materiálů, stejně jako popis jednotlivých složek kompozitního systému včetně mechanických vlastností. V další části je popsána únava materiálů a následné únavové chování při zatěžování, kde jsou součástí této kapitoly vysvětleny i křivky únavového zatěžování. Poslední část teoretické práce se pak zabývá faktory, které ovlivňují míru únavy a životnost konstrukčních kompozitů. Praktická část zahrnuje popisy jednotlivých úkonů, kterými jsou výroba zkušebních těles, následné měření a srovnání mechanických a únavových vlastností těchto těles s ohledem ve změně vrstvení, která má simulovat využití v praxi například u kompozitních listových pružin. Cílem je určit, zda vrstvení s překlady vykazuje vliv na výsledné vlastnosti daného prepregu.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiál je druh vícefázového materiálu, získaný cílenou kombinací odlišných materiálů za účelem nabytí vlastností, které jednotlivé komponenty nejsou schopny samostatně dosáhnout. Jedná se o kombinaci fyzikálních, chemických a mechanických atributů. Z hlediska struktury rozdělujeme jednotlivé komponenty podle účelu v daném kompozitu na matrici a výztuž. Výztuž může být tvořena uhlíkem, skleněným materiálem, aramidem apod. Výztužné fáze jsou velmi odolné, a jejich účelem je zajistit pevnost a tvrdost kompozitu. Účelem matrice je stmelovat a chránit výztuž vůči chemickým vlivům a vlivům okolního prostředí, přenášet zatížení mezi vlákna a vytvářet výsledný profil. Kompozity, na rozdíl od kovů a keramiky, jsou častokrát anizotropní materiály, což znamená, že jejich fyzikální vlastnosti jsou závislé na směru, ve kterém jsou měřeny. Tyto vlastnosti umožňují návrhářům efektivně využít materiál pro různé konstrukční zatížení. Z celé škály kompozitních materiálů patří mezi nejrozšířenější kompozity s matricí tvořenou polymery. Mezi jejich klíčové atributy patří méně náročná výroba a recyklace, ve srovnání s kovy a keramikou, v neposlední řadě i odolnost vůči korozi. Dominantní vlastnost, díky které je řadíme mezi tzv. progresivní konstrukční materiály, je vysoká hodnota specifické pevnosti. [1]

Tab. 1 Srovnání pevnostních charakteristik kovů a polymerních kompozitních materiálů

Materiál	Průměrná hustota ( $g/cm^3$ )	Pevnost (MPa)	Specifická pevnost ( $MPa \cdot cm^3 / g$ )	Normalizovaná pevnost
PP/ Skelná vlákna	1,48	720	486	1
Ocel	7,8	286-500	36-64	0,07-0,13
Slitiny mědi	8,3	60-960	7-116	0,01-0,24
Hliník	2,6	40	15	0,03

Vlastnosti kompozitů určují:

- vlastnosti jednotlivých složek (matrice a výztuže)
- vzájemný podíl jednotlivých složek
- geometrie výztuže (může být ve formě částic, vláken, lamel)
- typem rozhraní mezi matricí a výztuží (čisté rozhraní, rozhraní s mezifázové přítomností)

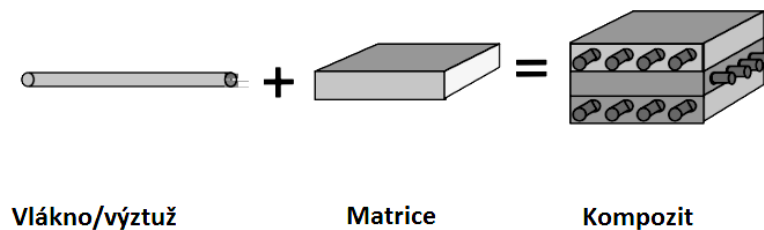
Znaky, které vykazují jednotlivé kompozity, lze do značné míry modifikovat pro potřeby jednotlivých aplikací, proto není možné generalizovat jejich charakteristiky. Přesto je možnost vyzvednout několik pozitivních a negativních vlastností. [4]

Výhody kompozitů:

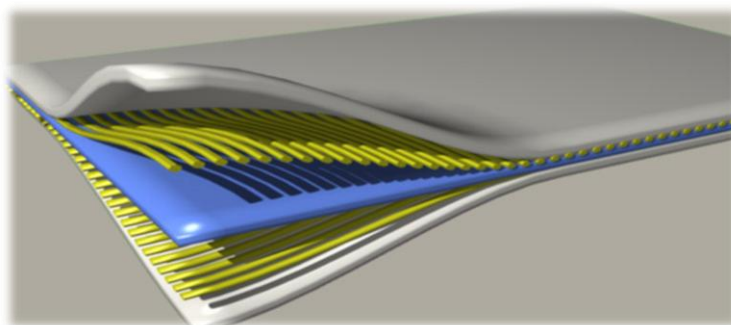
- nízká hmotnost (oproti kovovým materiálům)
- příznivý poměr pevnosti a hmotnosti (pevné a lehké zároveň)
- odolnost vůči korozi
- schopnost absorbovat nárazy
- flexibilita tvarování
- trvanlivost

Nevýhody kompozitů:

- méně předvídatelné chování materiálu
- sledování struktury a nedestruktivní kontrola je složitější než v případě kovů
- výrobní náklady



Obr. 1 Skladba kompozitního materiálu[8].



Obr. 2 Kompozitní materiál[8].

## 1.1 Historický pokrok a uplatnění v průmyslových odvětvích

Přestože kompozity v různých podobách jsou lidstvu známy již od nepaměti, s ideou využití kompozitů jako konstrukčního materiálu přišel v roce 1916 R. Kemp. Myšlenka pojednávala o vizi sestrojení letadla tvořeného téměř výhradně z vyztužených plastů. K prvním experimentům a prudkému vývoji došlo v 40. letech 19. století. Hnacím elementem pokroku byla II. světová válka a nově vzniklé potřeby armády. Na automobilový a letecký průmysl byly kladeny požadavky k výrobě vysokopevnostních a zároveň lehkých materiálů. U letadel a helikoptér nastával problém s nosností – čím vyšší váha stroje, tím méně nákladu byl schopen unést. Klíčem k úspěchu bylo použití skelných vláken, které v té době průmysl dokázal vyrobit. Průkopníkem se stala americká společnost Owens- Corning, která začala s masovou produkcí. O několik let se práva na využití jejich patentů dostala i do Evropy s vidinou dalšího růstu. Šedesátá léta přišli s novými požadavky pro rozvíjející se vojenské vesmírné programy. Sovětský Sputnik potřeboval materiál, který by odolal teplotám překračujících 1500 ° C a byl ještě lehčí a pevnější než kompozity se skelnými vlákny. Řešením se měl stát kompozit s kovovou maticí, avšak ani ten neměl predispozice odolat tak extrémním podmínkám. Aplikace kompozitů v období od poválečné éry až po současnost bylo možné sledovat primárně ve sportovním odvětví, kde původně ocelové golfové hole a dřevěné tenisové rakety byly nahrazeny pokročilejšími materiály. Rovněž probíhaly změny i v leteckém průmyslu – použití prioritně u křídel a trupů letadel. V současnosti nacházejí uplatnění například v počítačových komponentech (nanokompozity), zubním lékařství atd. [1, 6, 7, 8]

## 1.2 Rozdělení kompozitů

Kompozitní materiály lze rozčlenit do několika podskupin a to na základě: typu matrice, geometrie vyztužujících vláken a dle metody přípravy.

Podle typu matrice:

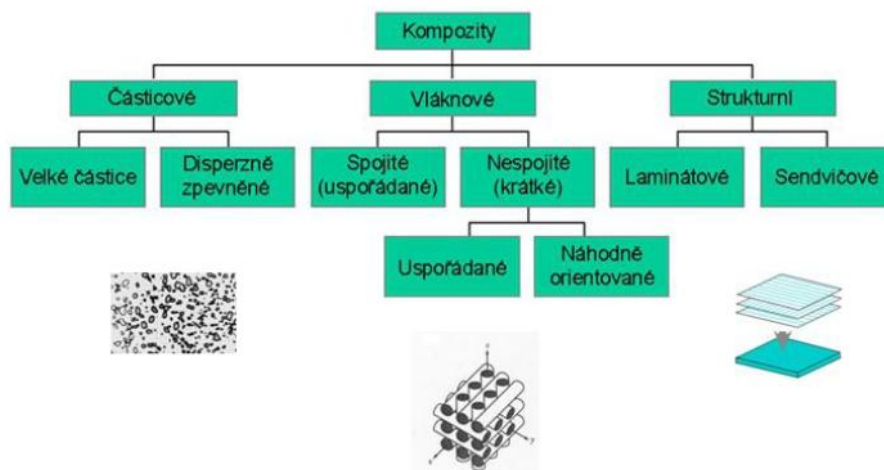
- s maticí tvořenou kovy
- s maticí tvořenou polymery
- s maticí tvořenou keramikou
- s maticí tvořenou uhlíkem

Podle geometrie vyztužujících vláken:

- částicové
- vláknové s dlouhými vlákny
- vláknové s krátkými vlákny, whiskery
- vrstvené (lamináty, sendviče)

Podle druhu plniva:

- kompozity s anorganickými plnivými (skleněné, keramické, kovové vlákna)
- kompozity s organickými plnivými (uhlíkové, aramidová vlákna) [2, 4]



Obr. 3 Rozdělení kompozitních materiálů [9].

### 1.3 Matrice

Matrice je spojitá složka kompozitního materiálu, která spojuje a chrání křehká vlákna výtuzi, zajišťuje geometrické uspořádání, zabezpečuje boční oporu vláken a distribuci zatížení na vlákna. Zásadně má nižší pevnost v tahu než vlákna, v některých případech až o dva řády. Oproti vláknům jsou naopak matrice podstatně poddajnější. [9].

Nejpoužívanějšími maticemi pro uhlíková a skelná vlákna se staly polyesterové, vinylesterové, epoxidové a různé termoplasty. Na náročné aplikace pro vojenský a kosmický průmysl jsou vhodné reaktoplasty a aromatické termoplasty. S maticí je možné pracovat pouze v jejím kapalném stavu. Proto je nutné řídit začátek tuhnutí přidáním vhodného množství vztužující složky do pryskyřice. Matrice se liší především teplotou zpracová-

ní a jejich fyzikálními vlastnostmi při teplotě zpracování. U jiných než uhlíkových a skelných vláken mohou být použity i keramické nebo kovové matrice. V následující tabulce je uvedeno porovnání teplot zpracování a teplot skelného přechodu pro běžně používané matrice [1], [12].

Tab. 2 Porovnání teplot zpracování a skelného přechodu u různých pryskyřic

Matrice	$t_z$ [°C]	$t_g$ [°C]
Nevyztužená nenasyčená polyesterová pryskyřice vytvrzená za studena	10 až 40	90-150
Nenasyčená polyesterová pryskyřice vytvrzená za tepla	≈140	90-150
Nevyztužená epoxidová pryskyřice vytvrzená za tepla	Např. 130	75-135
Polypropylen	200 až 270	-10/100
Polyéterketón	≈350 až 400	143

Hlavní podmínkou pro požadovanou kvalitu kompozitu je dostatečné smáčení všech vláken a výsledný materiál bez bublin. Proto je třeba použít dostatečné množství pryskyřice. Stává se že i v případě dostatečného množství pryskyřice může dojít k chybám a kazům ve výsledném kompozitu. Nejčastěji se ve výrobě řeší problémy s nízkou adhezí na rozhraní matrice-vlákno. Tyto problémy se řeší vhodnou apretací pro konkrétní typ vlákna a zvolení správné matrice s tužidlem. V závislosti na velikosti vyráběné součásti volíme matrici s vhodnou dobou vytvrzení. K dostatečně kvalitnímu sycení výztuže dochází pouze při kapalném stavu matrice, po přechodu do gelového stavu je už nepoužitelná [1], [9].

Kromě mechanických vlastností zajišťuje matrice i chemickou a tepelnou stálost. Častokrát bývá právě matrice limitující složkou v konstrukci kompozitních dílů do extrémních podmínek, protože je zodpovědná za celkovou soudržnost výrobku [9].

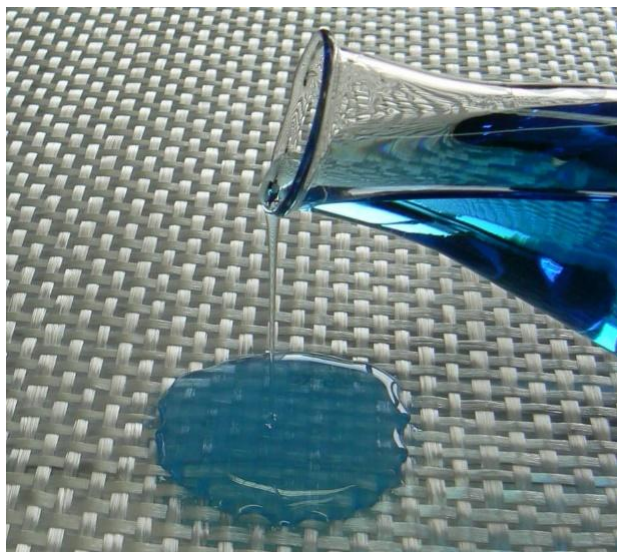


### 1.3.1 Reaktoplasty

Materiály patřící mezi amorfní polymery, které vytvářejí trojrozměrnou prostorovou síť a po termickém vytvrzení nereagují na teplo, nazýváme reaktoplasty. Jsou nerozpustné v organických rozpouštědlech, vodě a kyselinách. Po vytvrzení se sice v teplém prostředí neroztají, ale při přílišném zahřátí degradují. Reaktoplasty jsou velmi pevné a tuhé, což je způsobeno sítovou strukturou, která brání rotaci molekul. Zásíťování nastává po určitém čase za účasti zvýšené teploty nebo katalyzátoru. Po tomto procesu je reaktoplast vytvrzen a dále s ním nelze pracovat. Pryskyřice patřící do skupiny reaktoplastů: epoxidové, polyesterové, vinylesterové, izokyanátové a další [1,11], [13].

#### 1.3.1.1 Epoxidové pryskyřice

Dlouhou dobu nejpoužívanější pryskyřice na ruční laminování. Oproti polyesteru jsou epoxidy 3x až 4x dražší, ale přinášejí i jisté výhody. Při přípravě pryskyřice jsou používány různé aditiva – ředidla pro snížení viskozity, činidla pro zvýšení flexibility epoxidu a v neposlední řadě katalyzátory urychlující vytvrzování. Epoxidové pryskyřice se po vytvrzení smršťují jen velmi málo, okolo 2 %. To přináší nespornou výhodu ve vzniku pouze velmi nízkých vnitřních napětí, a proto jsou vhodné pro aplikaci i při větších součástech. Mají velmi dobrou smáčivost skelných vláken ve srovnání s polyesterovými pryskyřicemi. Předtím, než je v epoxidové pryskyřici zcela vytvořena síťová struktura, nachází se v mezifázi přimíchání. Tento stav epoxidové pryskyřice je využíván pro výrobu polotovarů, nazývaných Prepreg. Jde o tkaninu napuštěnou pryskyřicí, kde v závislosti na přidaných činidlech se dá s polotovarem dále pracovat [4,11].



Obr. 4 Tekutá epoxidová pryskyřice[11]

### 1.3.1.2 Polyesterové pryskyřice

Nenasycené polyesterové pryskyřice obsahují dvojitě vazby mezi atomy uhlíku. Přidáváním různých aditiv se dají ovlivnit vlastnosti polyesterové pryskyřice. Přidáním kyseliny orthoftalové se zlepšují zpracovatelské vlastnosti a zvyšuje se chemická odolnost, kyselina tetrahydroftalová zvyšuje houževnatost a tepelnou odolnost, kyseliny isoftalová a tereftalová pomáhají odolnosti vůči hydrolýze. Různé přísady nejen vylepšují jisté vlastnosti, ale jsou používány také jako objemové plniva, tedy zvláčňující materiál. Plniva jako křída, kaolin a hydroxid hlinitý zvyšují i viskozitu, což ovlivňuje zpracovatelnost pryskyřice. Polyesterové pryskyřice mají tak jako ostatní reaktoplasty dostatečnou odolnost vůči vodě a chemikáliím, zvětrávání, stárnutí a jsou velmi levné. Smrštění po vytvrzení dosahuje hodnoty mezi 4 % a 8%. Takové smrštění je nežádoucí a je způsobeno nerovnoměrným přechodem do gelového stavu. Z tohoto důvodu vznikají problémy s tvarovou stálostí. Přidáváním plniv a aditiv je možné snížit smrštění na 0,15 až 0,3 %. Jako plnivo jsou použity částice termoplastu, které působením tepla vytvářejí dutiny a tím vyrovnávají smrštění [1].

### 1.3.1.3 Fenolové pryskyřice

Tyto pryskyřice jsou vyráběny kondenzací fenolů a 30 až 50 % vodných roztoků aldehydů. Existuje množství variant fenolických pryskyřic a liší se podle různých druhů fenolických surovin a různých molárních poměrů fenol / formaldehyd. Pevné fenolové pryskyřice musí vytvrzovat přidáním tvrdidel a za zvýšené teploty, bez tvrdidla mají termoplastické vlastnosti. Vytvrzování probíhá ve dvoustupňové exotermní reakci. Uplatňují se jako pojivo pro izolační materiály, vodovzdorné dřevařské výrobky a brusné nástroje a kotouče. Vyznačují se výbornou chemickou a tepelnou odolností. V běžných vyztužených kompozitech se používají zřídka, protože pro velkoplošné díly jsou příliš křehké a při vytvrzování vznikají těkavé látky [1].

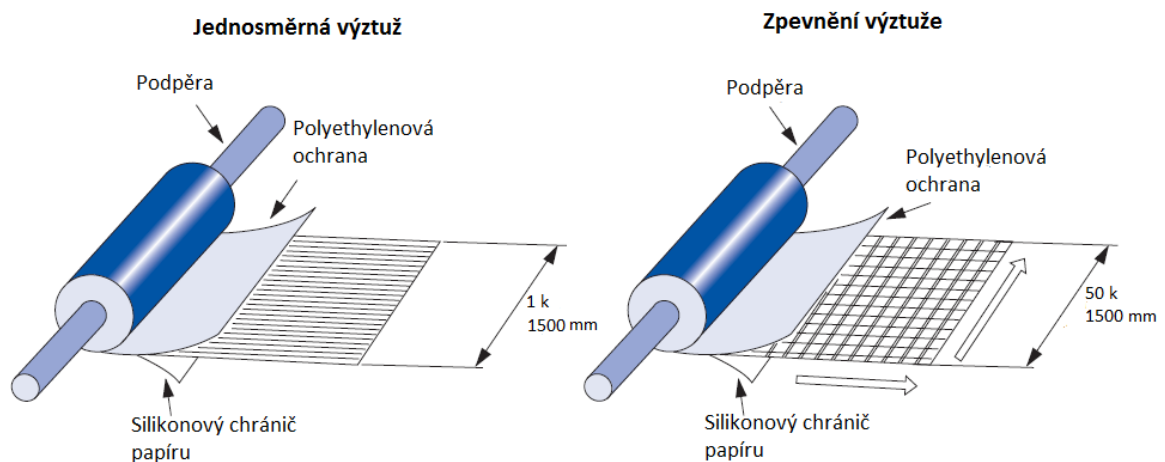
### 1.3.1.4 Vinylesterové pryskyřice

Mají vysokou houževnatost, jsou velmi dobře odolné proti alkalickým prostředím, avšak mají nižší tvarovou stálost za tepla. Oproti fenolové pryskyřici jsou reaktivnější, odolnější vůči teplotám, ale relativně křehké. Ve srovnání s epoxidovými pryskyřicemi mají nižší viskozitu a vytvrzování je dobře regulovatelné. Jsou vhodné tedy pro použití v prostředích s vysokým korozním namáháním a v některých aplikacích zcela vytlačily polyesterové pryskyřice. Používají se na velkorozměrné potrubí pro odvod plynu, chladicí věže, stavbu lodí, či při výrobě rotorových listů [1].

### 1.3.1.5 Technologie Prepreg

Pro výrobu kompozitů se často používají předimpregnovaná vlákna tzv. prepregy. Prepreg systémy se nazývají polotovary k výrobě vláknových kompozitů, jejichž hlavní složkou je předimpregnovaná výztuž napuštěná částečně vytvrzenými pryskyřicemi. Prepreg je zkrácený tvar anglického slova *preimpregnated fibres*, což v překladu znamená: „předimpregnovaná vlákna“. Prepregy znázorněné na obr. 5 jsou polotovary plochého tvaru, se speciálně vyvinutou pryskyřičnou maticí, která je vyztužená s umělými vlákny jako například uhlík, sklo a aramid. Tyto systémy se na sebe vrství do požadované tloušťky a ve formách se pak dotvarují a následně se dotvrdí působením tepla a tlaku. K impregnaci prepregů se nejčastěji používají nenasycené polyesterové pryskyřice, vinylové a epoxidové pryskyřice. Výsledný kompozitní materiál je vysoce pevný, teplotně odolný, mimořádně tuhý a extrémně lehký. Jednou z předností prepreg technologie je také jednodušší výrobní proces, kdy je strojově předimpregnována tkanina a vzniká kvalitní produkt s velmi nízkou objemovou hmotností a výbornými mechanickými

vlastnostmi. Z prepregů se vyrábí především kompozitní díly pro letectví a kosmonautiku, ale i další průmyslová odvětví včetně větrné energetiky, automobilového průmyslu a sportovního zboží. Známé jsou také technicky náročné produkty jako náběhové a brzdové klapky, kryty komunikačních přístrojů a turbín. Z novějších aplikací je to výroba podmořských trubek pro těžbu ropy a zemního plynu nebo výroba vysokotlakých nádob. [5]



Obr. 5 Varianty výztuže u výroby prepregů [5]

Prepregy s reaktivním termostatickým pojivem musí být skladován za chladu asi  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , přesto však má tento materiál trvanlivost pouze půl roku (v závislosti na reaktivitě pojiva). Před vlastním zpracováním se musí prepreg rozmrazit, a to nejlépe bez přístupu vzduchu. Poté se z něj připraví přířezy, které nastřiháme podle pokládacího plánu, aby byly připraveny na laminaci. Prepregy s termosetickou matricí jsou za pokojové teploty lehce lepidivé, což lze zlepšit ohřevem za lehce zvýšených teplot (max.  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Fixace polohy přířezů bývá často prováděno slabým přitlačením ručním válečkem či teflonovou stěrkou. Pružná a separační fólie se vždy přikládá na povrch výrobku a výrobek se vytvrzuje buď autoklávou, metodou lisování ve vakuu nebo metodou klasického lisování ve vyhřívané formě. Při sériové výrobě je výroba částečně automatizována, kde je prepregový pás pokládán pomocí číslicově řízených strojů, tudíž je výroba reprodukovatelná a z ekonomického pohledu výhodná. [11]

### 1.3.2 Termoplasty

Termoplasty se od reaktoplastů liší řadou rozdílů. Termoplasty jsou za normálních teplot tuhé látky a až po zahřátí převážně nad  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  jsou tekuté. Rovněž jsou podstatně náchylnější na kazy jako reaktoplasty. Toto je způsobeno velkými rozdíly v krystalizaci. Specifickou vlastností oproti reaktoplastům je, že termoplasty lze po zahřátí znovu tvarovat. S

možností opětovného zpracování ale přichází riziko zhoršení vlastností, především zhoršením odolnosti vůči nárazu, což je velmi nevýhodné pro letecký průmysl, ve kterém se odolnost vůči nárazům vyžaduje [1].

Oproti reaktoplastům, lineární řetězce molekul dodávají termoplastem vyšší hodnoty meze pevnosti, a to mezi 30 % až 100 %. Tento široký interval je závislý na odchylkách množství krystalizace. Obecně mají termoplasty vyšší viskozitu jako reaktoplasty, ale lze ji kontrolovat úpravou teploty při výrobě. Při zpracování je třeba být však opatrný, protože hrozí degradace matrice. Velkou výhodou pro termoplasty je jejich recyklace. Jsou tak výrazně příznivější pro životní prostředí než reaktoplasty. Jejich degradace může nastat buď za působení vysokých teplot, UV záření nebo absorpcí tekutiny. Absorpce tekutiny v prostředí způsobuje vyvěřeliny. Z toho vyplývá, že termoplasty jsou náchylnější na vlivy okolního prostředí než reaktoplasty [11].

#### **1.3.2.1 PEEK**

Jde o často využívanou termoplastovou matici především v aloplastice. Vyniká svou odolností vůči únavě a creepu, při dlouhodobém vystavení vlhkému prostředí nenastává degradace a neškodí mu ani vystavení teplotám až do 260 ° C, krátkodobě i do 300 ° C. Teplota tání Polyéter (éter) ketonu je až 343 ° C. Jde o termoplast s krystalickou strukturou. Taktéž vykazuje vysokou houževnatost jako při lomové zkoušce tak i při rázové zkoušce s padajícím tělesem. Výborné vlastnosti dosáhl i při únavových zkouškách s počtem cyklů 106, což ho předurčuje k použití i pro náhrady v lidské kostře. Materiál vykazuje vysokou odolnost vůči většině běžných rozpouštědel kromě 98 % roztoku kyseliny sírové [14].

#### **1.3.2.2 PEAK**

Jde o nástupce materiálu PEEK. Oproti předchůdci dosáhl vyšší tuhost v oblasti od 150 ° C do 190 ° C, zvýšila se chemická odolnost, pevnost a celková tuhost [14].

### **1.3.3 Kovy**

Nejrozšířenějšími kompozity s kovovou maticí jsou kompozity vyztužené částicemi nebo krátkými vlákny, protože jsou cenově dostupné a mají relativně izotropní vlastnosti v porovnání s vláknovými kompozity. Nejčastěji jsou vyztužovány keramickými částicemi jako SiC nebo TiB<sub>2</sub>. Jako matrice se používá množství kovů. Nejčastěji jsou to hliníkové, tita-

nové, hořčíkové a měděné slitiny, případně slitiny kovů. Hliníkové slitiny našly nejlepší využití v leteckém a kosmickém průmyslu, pro které byly i primárně vyvíjeny. Vynikají nízkou hustotou, houževnatostí a odolností vůči korozi. Příkladem může být velmi důležitá slitina Al-Cu-Mg a Al-Zn-Mg-Cu. Slitiny titanu se pro svůj výborný poměr pevnosti a hmotnosti, podobně jako slitiny hliníku, nacházejí v kosmickém a leteckém průmyslu. S bodem tání při teplotě 1672 ° C jsou vhodné pro aplikaci v proudových motorech. I při vysoké teplotě si totiž zachovávají pevnost. Matrice z ostatních kovů jsou využívány méně a většinou jsou hůře opracovatelné. Například kompozity s maticí z hořčíkových slitin se pro svou nízkou hmotnost používají v letectví jako kryty různých mechanismů [11].

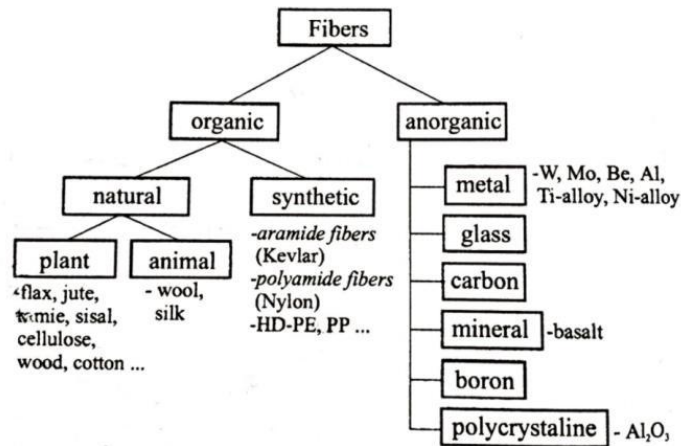
#### 1.3.4 Keramika

Keramické materiály mají vysokou pevnost, tuhost, nízkou hustotu, odolnost při vysokých teplotách a chemických látkách. Zásadní problém při těchto materiálech však nastává při houževnatosti, která prakticky při keramických materiálech neexistuje. Jsou velmi náchylné na teplotní výkyvy a snadno se poškodí při výrobě nebo montáži.

Oproti ostatním kompozitům jsou kompozity s keramickou maticí v některých základních ohledech jiné. Nejzásadnější rozdíl je v rozdělení namáhání v součásti. U ostatních kompozitech nese hlavní namáhání výztuž. Při keramických kompozitech je toto namáhání rozloženo rovnoměrněji mezi maticí a výztuž [11].

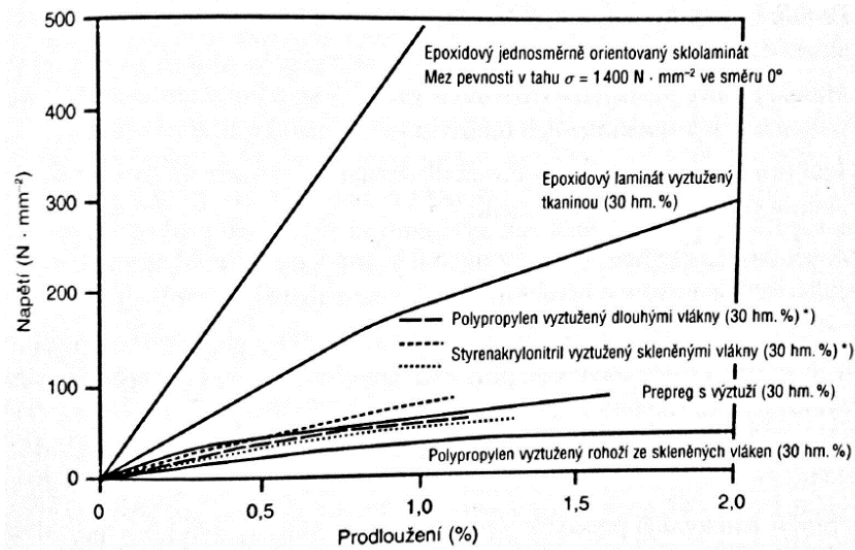
### 1.4 Výztuž

Výztuž je tuhousložkou kompozitních materiálů, která přenáší v součásti hlavní napětí. Základním polotovarem je částice, konečné nebo nekonečné vlákno z materiálu příslušné výztuže. Při výrobě laminátů, které jsou i nejčastější formou vyráběných dílů jsou používána nekonečná vlákna zpracována do několika podob. Materiály výztuže lze dělit do několika skupin. Schematické rozdělení je uvedeno na obrázku 6.



Obr. 6 Rozdělení materiálů výztuží [7]

Samotné vlákno nedokáže přenášet jiné zatížení než rovnoběžné. Pro využití mechanických vlastností vláken se ukládají do různých matic, kde se podle předpokládaného působení zatížení ukládají v různých základních směrech 0°, 90° a ± 45°. Graf závislosti napětí na prodloužení skelných laminátů s různou formou uspořádání výztuže a různou maticí zobrazuje obrázek 7 [1].



Obr. 7 Graf závislosti napětí na prodloužení různých vláknových kompozitů [1]

Důvod, proč jsou používána tenká vlákna namísto robustnějších polotovárů je ten, že pravděpodobnost výskytu fatálních kazů v objemu materiálu je značně nižší. Proto mají například tenká skelná vlákna 20krát vyšší pevnost než tyče z téhož materiálu. Vybrané mechanické vlastnosti některých používaných výztuží jsou v tabulce 3 [15]

Tab. 3 Mechanické vlastnosti používaných vlastností [4]

vlákno	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	E [GPa]	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon$ [%]
--------	-----------------------------	---------	----------------	----------------

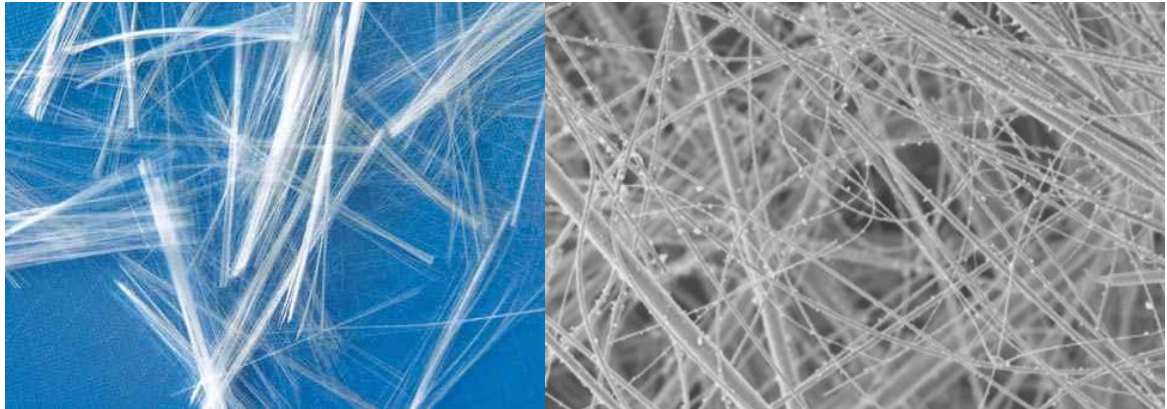
anorganické:				
azbest	2,56	160	3100	1,9
sklo	2,54	70-85	2200-3500	2,5
borová vl.	2,65	420	3500	0,8
SiC	2,6	250	2200	0,9
uhlík	1,86	300-800	2700	0,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Si O <sub>2</sub>	3,2-3,9	300-414	1800-2000	0,3-0,8
organické:				
Kevlar 49	1,45	130	2900	2,5
Kevlar 29	1,45	60	2700	5,0
Kevlar 129	1,44	120	3000	3,0
Kevlar 149	1,45	190	2600	2,5
PE Spectra	0,97	172	3000	1,7
PBT	1,50	250	2400	1,5
Len	1,30	180	2600	3,1

#### 1.4.1 Skelná vlákna

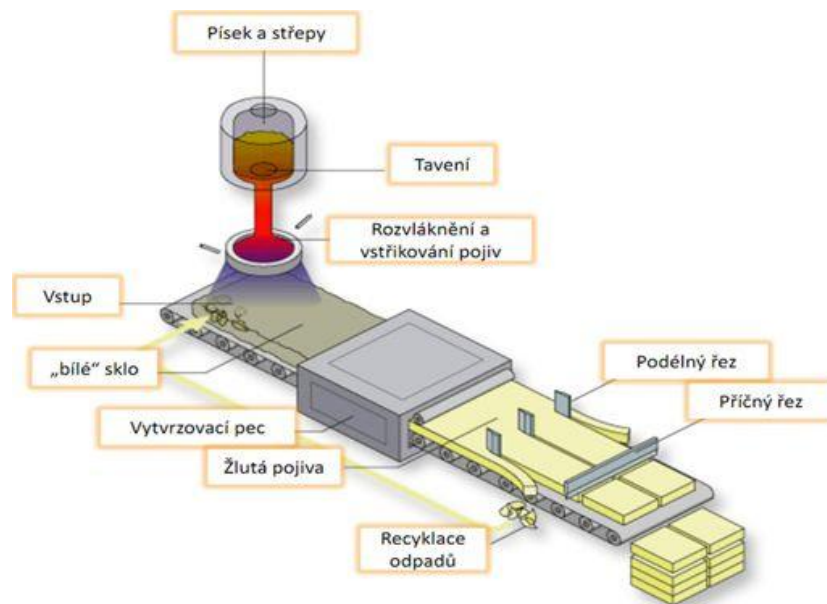
Vzhledem k příznivé ceně a velmi dobrým mechanickým vlastnostem jsou dnes skelná vlákna nejpoužívanější výztuží. Jsou zcela nehořlavé. Skelné vlákno má pevnost v tahu 2200–3500 MPa. Oproti modernějším vláknům se však vyznačují nižším modulem pružnosti, jen 70–85 GPa a sklonem k lámavosti, což je problém při manipulaci a nemožnost aplikace jako balistické ochrany [15].

Vylepšení v některých ohledech přinesly skelná vlákna se silikátovým základem, kdy se sice pevnost v tahu snížila na 1800–2000 MPa, ale modul pružnosti v tahu stoupl na 300 - 414 GPa. Z technologických důvodů se tloušťka vláken běžně pohybuje od 7 do 15 um. Tato vlákna se vyrábějí tažením taveniny a před samotným navinutím na cívku do rovin je aplikována povrchová úprava. Kontakt mezi neošetřenými vlákny by způsobil velkou abrazi, což by vedlo k poklesu pevnosti. Hned po vytvrzení vlákna je aplikována lubrikační látka, která dovoluje zpracovat vlákna jako do rovin, tak následně do tkaniny. Tuto vrstvu je pak nutné odstranit, aby bylo dosaženo co nejlepší adheze vlákna a matrice. Tkaniny se pak ještě ošetřují vazebnými prostředky, které mají dobrou afinitu ke skelným vláknům i k polymerní matici [9], [15].





Obr. 8 Skelná vlákna [9]



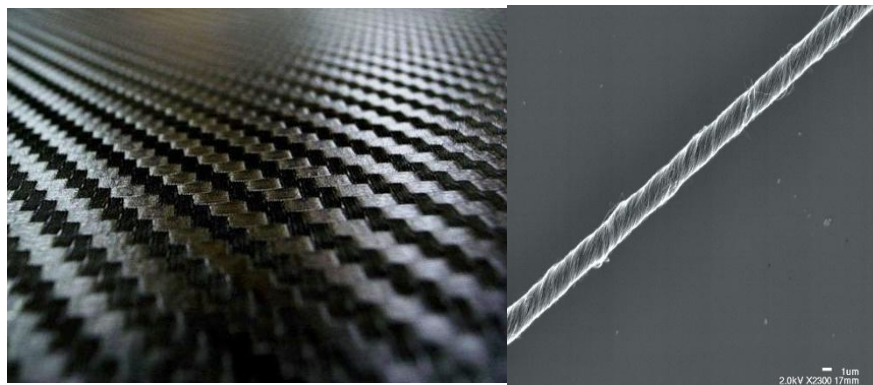
Obr. 9 Technologie výroby skelného vlákna [9]

#### 1.4.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna se vyznačují nejširším spektrem mechanických vlastností při nízké hustotě, proto se hodí pro aplikace, kde je požadována vysoká pevnost a tuhost při nízké hmotnosti. Oproti skelným vláknům jsou však podstatně dražší, což jejich záběr využitelnosti trochu zužuje. Pevnost v tahu se pohybuje mezi 1500–3000 MPa a modul pružnosti v tahu je 150–300 GPa. Zvláštností uhlíkových vláken je záporný koeficient délkové teplotní roztažnosti, tedy při zahřátí se vlákno zkracuje. Další specifickou vlastností je vytváření galvanického článku při styku s méně ušlechtilými kovy a vznik koroze. Proto je při kon-

struční nutně oddělit tyto dvě složky nevodivým materiálem nebo aplikováním povrchové úpravy.

Podobně jako na skelná vlákna, tak i na uhlíkové je nutně aplikovat povrchovou úpravu. Nejčastěji se povrch ošetřuje polymerními povlaky na bázi epoxidů nebo polyamidů. Účelem je ochrana vláken proti abrazi, zajištění lepší absorpci matrice do vlákna, případně odstranění látek, které zůstaly na povrchu od výroby. Navzdory vysoké ceně a zmíněným specifickým vlastnostem však postoupili z dopravních letadel na ultralehké, a kromě super sportovních aut nacházejí uplatnění i v pohonech běžných automobilů [9].



Obr. 10 Uhlíková vlákna [9]



Obr. 11 Pracovní linka pro výrobu vláken PAN [9]

### 1.4.3 Aramidová vlákna

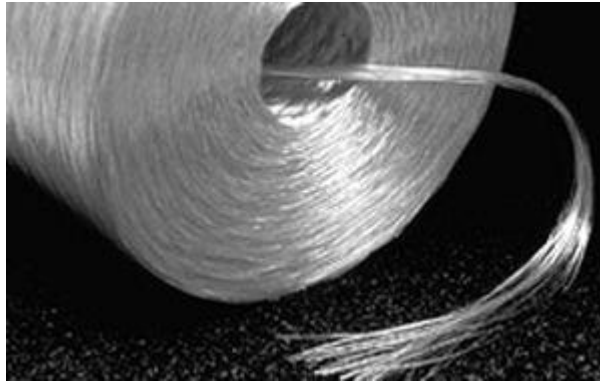
Také známé pod jedním z obchodních označení – Kevlar. Jsou nejnázve vyztužující vlákna a jsou schopny plastické deformace kolmo na osu vlákna. Vyznačují se vysokou abrazivní odolností. Dosahují pevnost v tahu mezi 2500–3500 MPa a modul pružnosti 70–170 GPa. Hodnoty mechanických vlastností se liší v závislosti na výrobní technologii. Jsou vhodné pro výrobu prostředků balistické ochrany a výrobu ochranných oděvů. Častokrát se objevují například spolu s uhlíkovými vlákny v hybridních tkaninách a lze je zpracovávat se všemi běžnými reaktoplasty a termoplasty. Podobně jako uhlíková vlákna, mají i aramidová záporný součinitel teplotní roztažnosti ve směru osy vláken [9].



Obr. 12 Kevlarová vlákna [9]

### 1.4.4 Bórová vlákna

Vyrábějí se technologií CVD. Na wolframovém vlákně se vytváří elementární bor ze směsi plynů vodíku a chloridu boritého. Tedy borové vlákno má wolframové jádro a na povrchu je bór. Jsou náchylné k oxidaci za zvýšených teplot a reakci s roztaveným hliníkem, proto se povlakuje SiC nebo B<sub>4</sub>C. Těmito povlaky se kromě ochrany docílí i vyšší smáčivost s matricí. Vyznačují se vysokou pevností – až 4000 MPa a malou tepelnou roztažností. Oproti skleněným či uhlíkovým vláknům dosahují větší tloušťku, 100  $\mu$ m. Nejčastěji jsou používány s hliníkovou matricí. Borové vlákno se nemůže ohýbat a nedá se tkát. Proto jsou používány na plošné díly, u nichž se vyžaduje vysoká tuhost. Poprvé byly použity na výrobu raketoplánů. Pro reakce s hliníkem se však nahrazují modernějšími vlákny [9], [16, 17, 18].



Obr. 13 Bórové vlákno [16]

#### 1.4.5 Ostatní

Méně významné jsou přírodní rostlinná vlákna například z konopí. Používají se na výztuž dílů automobilů, především v interiérech. Výhodou použití těchto vláken je jejich cena, nízká náročnost na opracování a v neposlední řadě jednodušší recyklovatelnost oproti ostatním kompozitům [9].

### 1.5 Mechanické vlastnosti kompozitů

#### *Tuhost*

Tato veličina vyjadřuje sílu, kterou musíme vynaložit, abychom zjistili deformaci tělesa v pružné oblasti deformací, kde mírou této síly je modul pružnosti ve smyku a v tahu.

#### *Pevnost*

U polymerů se tato veličina mění v návaznosti na jejich strukturu ať už molekulární, nebo nadmolekulární. U tvarů křivek z provedené zkoušky zjistíme, zda daný polymer leží v oblasti teplot pod nebo nad teplotou skelného přechodu  $T_g$ . Při překonání pružné deformace dojde k přetržení tělesa, a to u amorfních polymerů, které se nachází pod  $T_g$ . Například u některých semikrystalických polymerů dochází při překonání meze kluzu a napětí na mezi pevnosti ke zpevňování, a tak může být i několikrát větší než napětí na mezi kluzu.

#### *Tvrдость*

Poměrně složitá veličina, kde souvisí jak vnitřní vlastnosti, tak i kvalita povrchu daného polymeru. U elastomerů existují určité empirické vztahy při přepočtu mezi tvrdostí a modulem pružnosti ve smyku. Podle literatury lze uvést tvrdost, která je v časté míře používá-

na pro charakterizaci elastomerů, poté tvrdost HRC pro tvrdé polymerní materiály pod  $T_g$ , kde se jako nejčastěji zkouška vykonává vtiskem kuličky do zkušební vzorku.

### *Houževnatost*

Tato důležitá vlastnost materiálu poukazuje na množství práce, která je zapotřebí ke vzniku nového povrchu. U této vlastnosti materiálu ji nejlépe dokáže vystihnout hodnota lomové houževnatosti  $K_c$  a hnací síla trhliny  $G$ . Tyto veličiny se v literatuře nevyskytují, a tak jsou hlavním předmětem provedení zkoušek. Ve větší části je nutné se omezit na údaje, které jsou poskytnuty plastikářskými zkušebními metodami, tj. rázová houževnatost metodou Izod a Charpy s vrubem či bez vrubu. Pro vysoce houževnaté materiály je zapotřebí použít tělesa s jiným tvarem vrubu než u méně houževnatých materiálů, tím pádem je vzájemné srovnání těchto dvou materiálů na základě číselných údajů o vynaložených energii dosti složité. [19]

### **1.5.1 Druhy zkoušek mechanických vlastností**

Obvykle nás při technickém použití polymerů zajímá především jejich mechanická pevnost působící proti různým silám. Tyto zkušební metody můžeme rozdělit do těchto tří skupin:

**Statické zkoušky** – materiál je u těchto zkoušek namáhán pomalu se měnícími silami. Působící síla se zvyšuje rovnoměrně pomalu, obvykle tak bývá až do okamžiku porušení zkušební tělesa.

**Dynamické zkoušky** – u tohoto typu zkoušek se působení síly mění buď rázem, nebo se síla mění za velmi krátký časový úsek. V některých případech zkouška probíhá tak, že působení síly je dlouhodobé, ale její velikost se mění periodicky ve velmi krátké době

**Únavové zkoušky** – Mechanické vlastnosti se u této zkoušky zkoušejí dlouhodobě za předem předepsaných podmínek časově proměnného namáhání, často až do porušení materiálu, kde tyto zkoušky bývají odlišné pro každý jednotlivých druh polymeru.

Mechanické zkoušky často neprovádíme na samotné součásti, nýbrž na zkušebních těleších předepsaného tvaru a rozměrů. [20]

## 2 ÚNAVA MATERIÁLU

Cílem únavových zkoušek je určení únavového života součásti, nebo místo vzniku porušení na zkušebním tělese podrobení předem určené posloupnosti amplitud napětí. V některých případech toto může být jediný důvod dělání zkoušky, například složitější sestavy se podrobí takovým zkouškám za účelem simulace zátěžové historie probíhající v průmyslu. Ve většině případů je ale třeba, aby zkoušky byly navrhované za účelem nejen zodpovězení námi hledaných otázek, ale aby nám výsledky napomohly k zobecnění a vzniku nových pravidel týkajících se mezi únavy s rozličnými ovlivňujícími faktory. Je proto nezbytné, aby se zkoušky prováděly za podmínek buď to s ohledem na posloupnost zátěžových amplitud nebo na testovaný vzorek nebo na obojí. Zjednodušením zkušebních podmínek by mělo být možné změnit jeden nebo více faktorů, které zkoušku ovlivňují a zjistit jejich účinek. I když se nám podaří tyto podmínky splnit, stále zůstává několik neznámých a nekontrolovaných prvků, které vytvářejí rozptyl v únavových životech těles, které se dají považovat za identické. V minulosti se tento rozptyl nepovažoval za důležitý a pro určení únavového života se používalo jen pár vzorků. V dnešní době se tento rozptyl považuje za přirozenou součást únavových vlastností a pro určení únavového života je třeba větší množství vzorků. [4]

Nejjednodušším příkladem testů s ohledem na amplitudy zatížení je aplikování napětí konstantní amplitudy na zkušební těleso, dokud nenastane lom. Pro nové těleso může být použito jiné napětí, ale pro každé jednotlivé těleso se amplituda během celé zkoušky nemůže měnit. Tento typ únavové zkoušky se nazývá zkouška při konstantní amplitudě.

V závislosti na velikosti amplitudy napětí můžeme zkoušky za konstantní amplitudy rozdělit do tří kategorií:

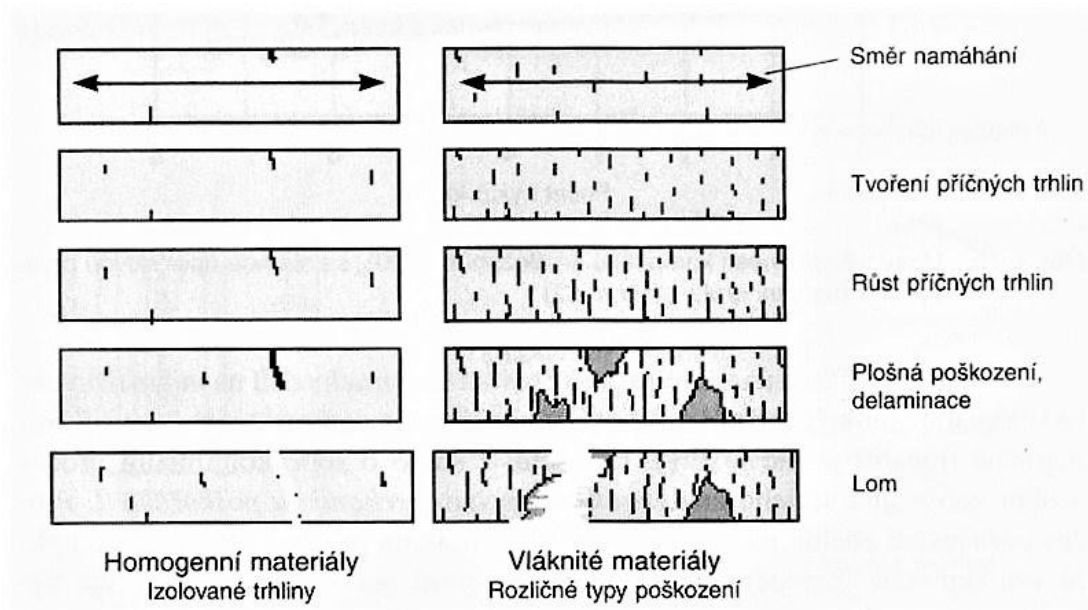
1. Rutinní zkoušky, kde je použité napětí je vybíráno tak, že při všech zkouškách nastává lom po přiměřeném počtu cyklů, řekněme od  $10^4$  do  $10^7$ .
2. Nízkocyklové zkoušky, kde amplituda napětí je volena z oblasti nad mezí kluzu a v některých situacích může nastat lom okamžitě po použití zatížení.
3. Vysokocyklové zkoušky, při kterých je amplituda napětí volena pod nebo mírně nad mez únavy a porušení vzorku nastává při  $10^6$  až  $10^7$  cyklů.

Samozřejmě, neexistuje přesná hranice, která by oddělovala jeden typ od druhého. [4]



## 2.1 Únavové poškození kompozitních materiálů

U kovových materiálů můžeme počítat se vznikem lokálně působící trhliny, kdežto u vláknových kompozitních materiálů se vytváří při dynamickém namáhání různé typy trhlin ve velkém objemu materiálu. Tyto trhliny pak nemají tak velký vliv jako u kovových materiálů (Obr.14). Tento růst trhlin pak zpravidla může být zastaven vedlejší houževnatější složkou materiálu. [1]



Obr. 14 Rozdíl u poškození homogenních a kompozitních materiálů [1]

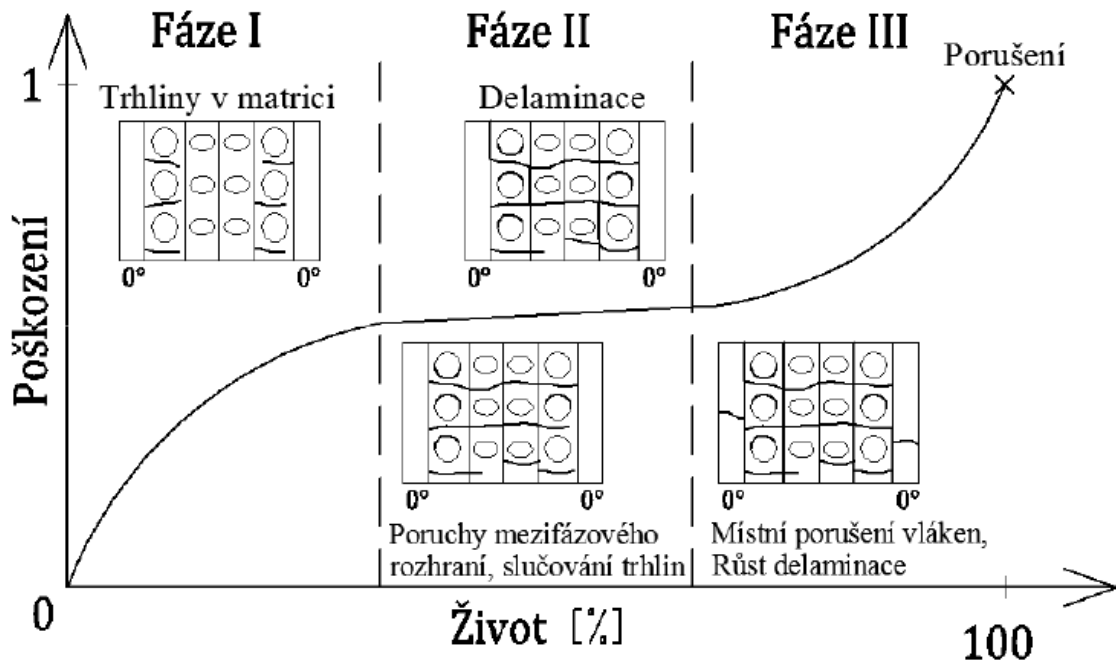
Typy, které se vyskytují u poškození a vzniku trhlin u vyztužených kompozitů lze dělit do těchto skupin:

- Trhliny v matrici
- Porušení vláken
- Porušení vláken s matricí
- Porušení soudržnosti jednotlivých vrstev (delaminace)

### 2.1.1 Fáze poškození

Při únavovém poškození kompozitního materiálu lze tento typický proces rozdělit do tří fází. V první fázi nastává poškození už při několika desítkách cyklů a je často doprovázeno strmým nárůstem tohoto poškození, kde se hlavním mechanismem se stává iniciace trhlinek přímo v matrici. Ve druhé fázi nastává postupným nárůstem poškození, kdy je rostoucí hustota trhlinek hlavním mechanismem této změny v poškození. Při této změně se vysky-

tuje vláknové přemostění, oddělování matrice od vlákna, rozptýlené porušení vláken a může zde být iniciována i delaminace. V poslední třetí fázi dochází k růstu delaminace, globálnímu porušení a taktéž k masivnímu porušení vláken. [21]



Obr. 15 Rozvoj typů poškození během zkoušky u kompozitních těles

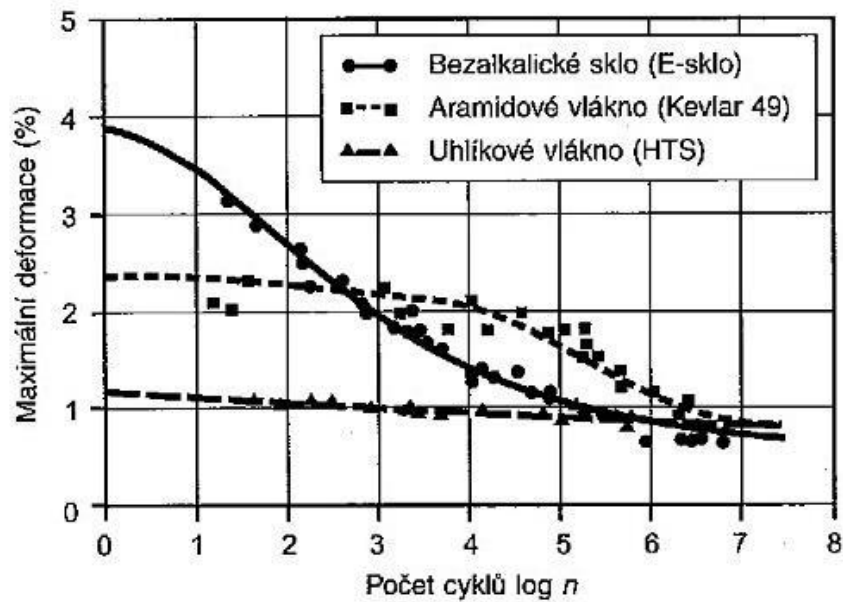
Celkový rozsah a časový úsek u jednotlivých typů poškození je závislý na jednotlivých vlastnostech daného kompozitu (např. obsahu a typu vlákna, orientace vrstev) a také na působícím napětí. U těchto poškození se za vznik a rozvoj považuje i spolupůsobení ostatních typů poruch, tudíž je často kvalitativně obtížné ocenit vliv jednotlivých poruch a poté vyvodit výsledky a obecné zákonitosti procesu porušování.

Při procesu únavového poškození lze dělit poruchy na

- **Mikroskopické** – velikost jednoho nebo více průměrů vlákna
- **Makroskopické** – velikost minimální tloušťky jedné vrstvy

Při procesu porušování se začíná na mikroskopické úrovni, kde vznikají třídídimenzionální oblasti poškození. Tento jev se projevuje snížením tuhosti materiálu a když se dosáhne kritická hodnota, zbytková pevnost či tuhost klesne pod úroveň působícího namáhání a dojde tak k lomu. Samozřejmě závisí i na vlastnostech daného materiálu a použitým typem pryskyřice či volbě materiálu u vláken. [21]





Obr. 16 Srovnání únavových vlastností u kompozitů [1]

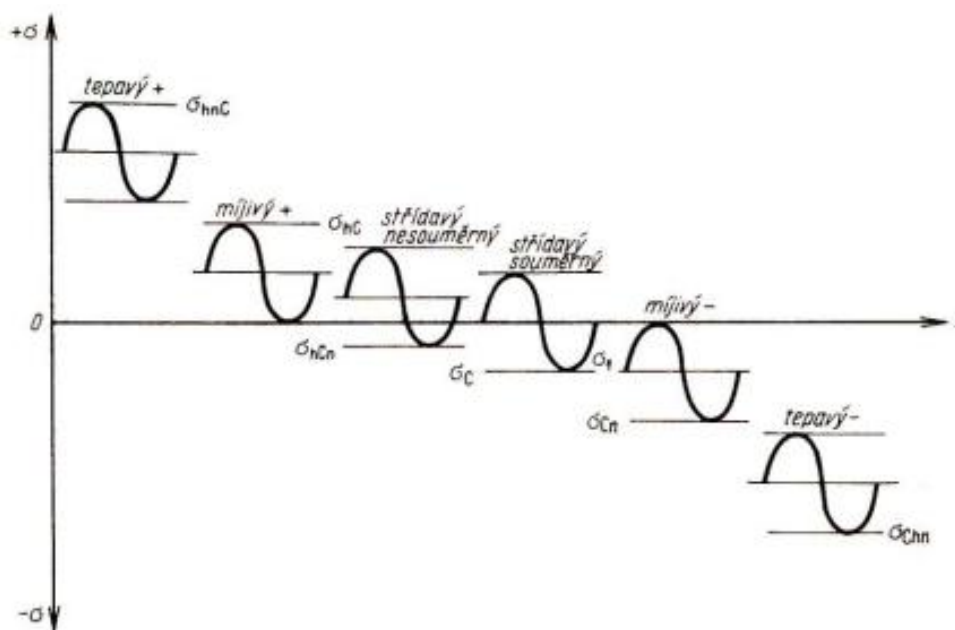
## 2.2 Únavová zkouška

Při dynamickém zatížení se pro zjištění namáhání vyskytují dvě metody, jednostupňová a víceúrovňová zkouška. Jednostupňová zkouška probíhá tak, že je vyšetřovaná úroveň zatížení, při které se projevují změny vyvolané únavovým zatížením. Kdežto víceúrovňová je protikladem, kdy samotná zkouška probíhá tak, že se zkušební těleso zatíží na danou úroveň napětí či deformace, kde u materiálu neprobíhají žádné změny ani tvorba trhlin. Poté následuje stupňovité zvyšování zatížení až do doby, kdy můžeme míru poškození zjistit. [1]

### 2.2.1 Typy zatížení

U kompozitních materiálů vznikají odlišné mechanismy porušování, proto se chovají jinak ať jsou zatěžovány tlakem či tahem. Při zatížení tahovým namáháním má na únavové chování vliv hlavně vyztužující vlákno, při zatížení tlakem má větší význam typ použité matrice a vady materiálu. U cyklického zatížení se můžeme především setkat se sinusovým průběhem, kdy se jeho hodnoty mění od minima do maxima. U dynamických zkoušek pak mohou být zkoušky provedeny ve třech rozsazích, kde se můžeme setkat až se sedmi typy zatížení. U této úrovně cyklického namáhání je charakteristickým rozměrem poměr dolního a horního napětí. Největší amplitudou napětí  $\sigma_D$  je pak dána únavová pevnost, kde zjis-

tíme, jaký počet je zkušební těleso schopno absorbovat cyklů. Při překročení této únavové pevnosti nastává přelomení vzorku. [1], [22]



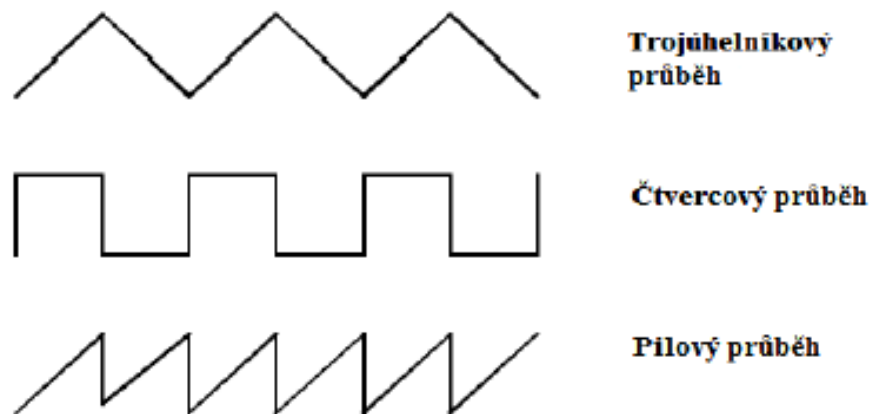
Obr. 17 Typy a úrovně cyklického zatěžování [1]

### 2.2.2 Frekvence při zkoušce

Nejdůležitějším faktorem u testování materiálů z kompozitů je frekvence zatěžování. Tato frekvence má hlavní vliv na únavovou životnost materiálu. Hlavní veličina je zde frekvence, která se značí písmenem  $f$  a jednotky k této veličině jsou Hertze (Hz), tuto veličinu uvést i v počtech cyklů za sekundu. Když použijeme vysoké frekvence může dojít k ohřevu materiálu což je nežádoucí jev při testování. Pro vyloučení tohoto jevu volíme u nevztužených termoplastů frekvenci 1-5 Hz a u vyztužených se volí 5-10 Hz. Samozřejmě zkoušky únavy probíhají pro různé deformační rychlosti a pro různé typy zatížení vždy při konstantní frekvenci. [1], [22]

### 2.2.3 Průběh zatěžování

Důležitým elementem pro únavovou životnost materiálu je taktéž tvar průběhu zatěžovací křivky. Mezi nepoužívanější průběh zatížení je brán sinusový, je jednoduše definovatelný na stroji a taktéž odpovídá reálnému zatěžování. Mezi další průběhy zatěžování mohou být brány tvary jako čtvercový, trojúhelníkový či pilový. [22]



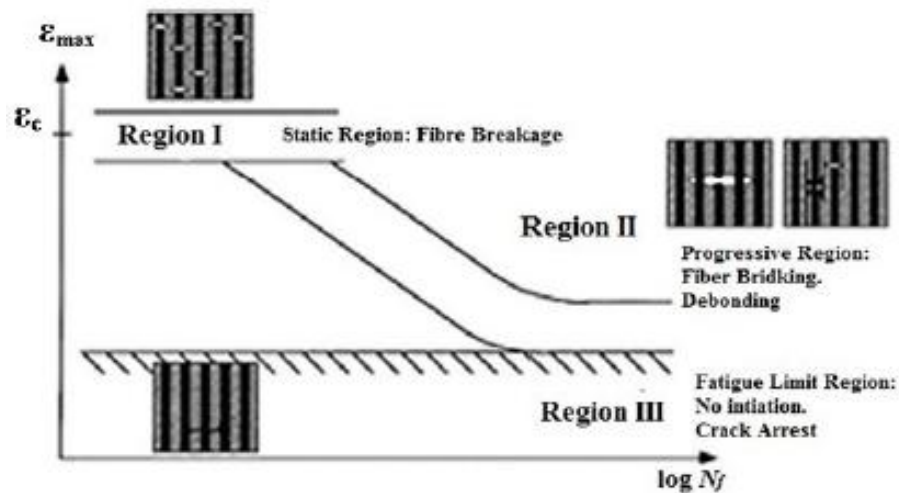
Obr. 18 Možné modifikace u zatěžovací křivky [1]

## 2.3 Křivky únavového zatěžování

### 2.3.1 Křivka životnosti $\epsilon_A - N_f$

Už v počátcích zkoumání poškozování kompozitů existoval zkreslený předpoklad, kdy proces únavového poškození měl stejně jako u kovů skládat z fáze inicializace a šíření defektu. Při zkoumání nebyl vůbec zohledněn rozdíl mezi polymerní strukturou matrice kompozitního materiálu a krystalickou strukturou materiálů kovových. V tomto případě se jedná o závislosti počtu cyklů do úplného porušení na maximální možné deformaci při prvním cyklu při měkkém zatěžování. Následný diagram je pak rozdělen do tří oblastí.

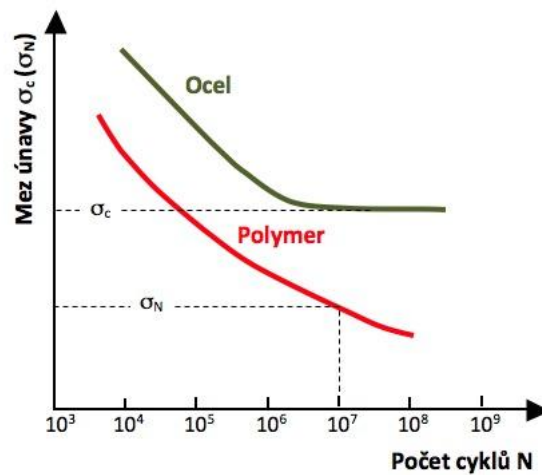
- Oblast 1 – pásmo rozptylu statické pevnosti v tahu. Porušení je náhodné a náhlé porušení vláken.
- Oblast 2 – zde dochází k postupnému poškozování. Vznikají trhliny v matrici, praskání matrice a přes rozhraní vlákno-matrice vzniká "vláknové přemostění"
- Oblast 3 – zastavení šíření mikrotrhlin v matrici na rozhraní vlákno-matrice. U vysokotuhostních kompozitů však může dojít k dezinterpretaci, kde pás rozptylu leží celý v oblasti 3 a tak může dojít ke špatné informaci, že u vysokotuhostních kompozitů nedochází k únavovému poškozování.



Obr. 19 Diagram únavové životnosti zatěžovaný ve směru vláken [22]

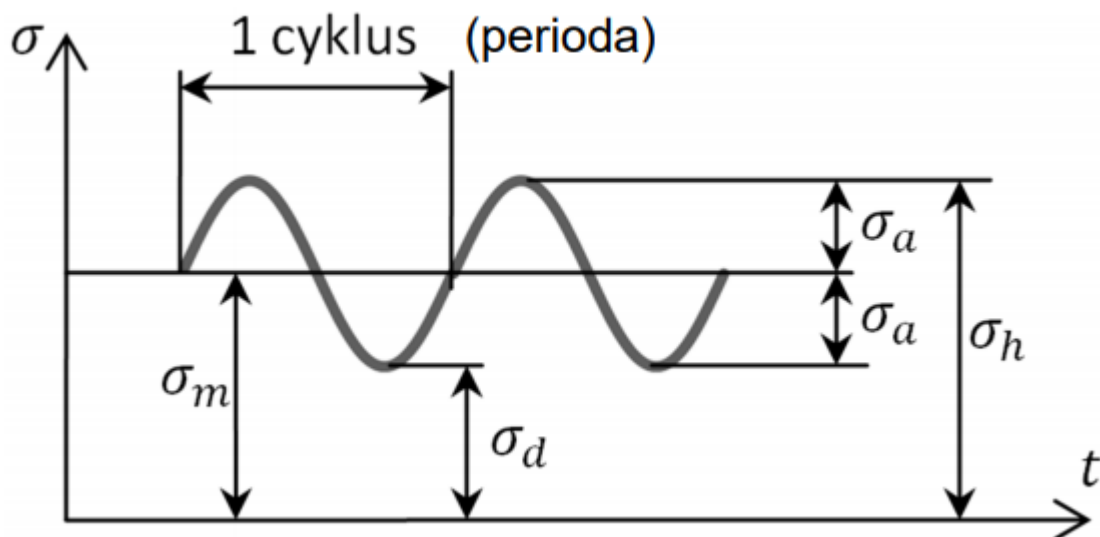
### 2.3.2 Wöhlerova křivka

Tato křivka bývá taktéž označována jako S-N diagram, která je nejrozšířenější k popisu únavového chování u vláken vyztuženými kompozitními materiály. Hlavním kritériem únavy je lom, kde se uskuteční porušení zkušební vzorku. U součástí, které zatěžujeme dynamicky, je lom často nedostatečným kritériem, nýbrž u kompozitních materiálů se s rostoucím zatížením a následnou únavou více či méně dostavuje pokles tuhosti. Tento pokles je pak možný pro použití materiálů pro konstrukční prvky, kdy se s počtem cyklů můžou měnit vlastnosti v určitých mezích. Když budeme brát jako kritérium únavy pokles tuhosti například o 10 až 20 % a následně ho vyneseme do Wöhlerova diagramu, zjistíme další informace o časovém průběhu únavového chování. Abychom poté zjistili a stanovili zbytkovou pevnost, musíme po určitém počtu cyklů podrobit zkušební těleso statické zkoušce. [1]



Obr. 20 Wöhlerova křivka pro srovnání polymer a ocel

### 2.3.2.1 Zatěžovací cyklus



Obr. 21 Charakteristika cyklického zatěžování [1]

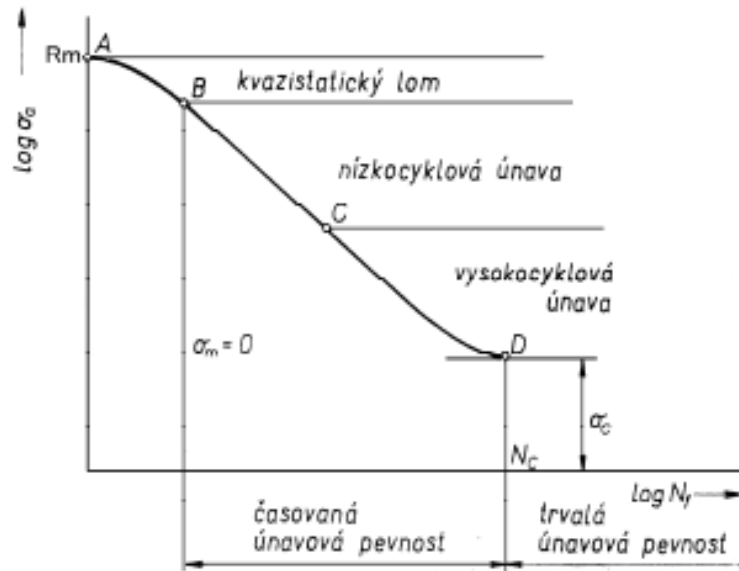
- $\sigma_a$ ... amplituda napětí
- $\sigma_h$ ... horní napětí
- $\sigma_d$ ... dolní napětí
- $\sigma_m$ ... střední napětí =  $\frac{\sigma_h + \sigma_d}{2}$

### 2.3.2.2 Oblasti Wöhlerovy křivky

Mezi oblastí Wöhlerovy křivky patří tyto:

- Oblast kvazistického lomu: Lom nastává po několika desítkách cyklů

- Oblast nízkocyklické únavy: Nastává zde vyšší napětí jako je mez kluzu  $R_e$
- Oblast vysokocyklické únavy: Nastává zde nižší napětí jako je mez kluzu  $R_e$



Obr. 22 Charakteristické oblasti na Wöhlerově křivce [1]

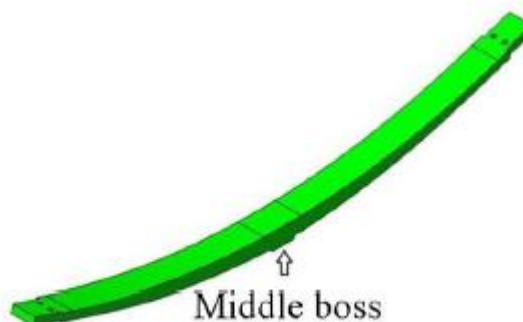
### 3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ÚNAVOVÉ CHOVÁNÍ A ŽIVOTNOST

Polymerní materiály nacházejí velké uplatnění v technickém průmyslu hlavně pro jejich velkou odolnost vůči korozi. Proto se používají ve velké míře jako ochranné prostředky kovů, stavebních hmot, dřeva a někdy je i dokonce nahrazují. Avšak nejsou odolné v plné míře. U polymerních materiálů vystavených fyzikálním, chemickým, případně biologickým procesům v delších časových intervalech dochází k nevratným změnám a také stárnutím. Souhrn rozkladových reakcí polymerů označujeme pojmem degradace. Depolymerizace je proces, během kterého degradují makromolekuly na nižší strukturální jednotky případně až na samotné monomery. V případě, že dochází k hloubkovým procesům dá se tento děj označit i jako rozklad. Během tohoto procesu dochází k odbourávání spojenému se změnou chemické struktury daného materiálu. Pojmem koroze označujeme znehodnocení materiálu vzájemným chemickým nebo fyzikálněchemickým působením okolního prostředí. Tento proces nevyžaduje světelnou ani tepelnou iniciaci, avšak tepelná energie ho urychluje. Proces probíhající v materiálu v důsledku dlouhodobého statického nebo cyklického namáhání lze označit jako únavu materiálu. Tento děj způsobuje pokles mechanických vlastností materiálu, což v konečném důsledku znamená, že dochází k jeho porušení při nižších napětích. Negativní změny materiálu neprobíhají pouze při jeho používání, ale často k nim dochází již při samotném zpracování nejčastěji vlivem mechanického a tepelného namáhání. Studium těchto dějů vede k novým poznatkům, umožňujících omezení, případně předcházení negativních dopadů na polymer. [23]

#### 3.1 Vliv skládání vrstev

Na míru únavových vlastností z kompozitů a výrobků z něj má velký vliv vrstvení jednotlivých vrstev, a to zejména u kompozitních pružin. Mezi jeden z příkladů lze uvést listovou kompozitní pružinu, ve které je tloušťka jednotlivých složek měněna přesahující délkou ukončených vrstev a vytvářením mezer v bodech podél ní. U symetrického, spojitého kompozitu s konstantním průřezem pod jednosměrným napětím ve směru vláken je namáhání jednoosé a rovnoměrné v rámci vrstev rovnoběžně s působícím zatížením. U listové kompozitní pružiny je namáhání stále rovnoměrné v dostatečné vzdálenosti od mezer vrstvy a oblasti pro aplikaci zatížení, avšak při každém poklesu mezery musí být napětí v rozvěvené vrstvě přerozděleno do sousedních vrstev. Tento přenos napětí se projevuje na krátké vzdálenosti, čímž se vytváří lokální oblast s vysokým smykovým napětím, což znamená, že interlaminární pevnost materiálu je důležitá pro kuželové kompozity. Na obr. 24

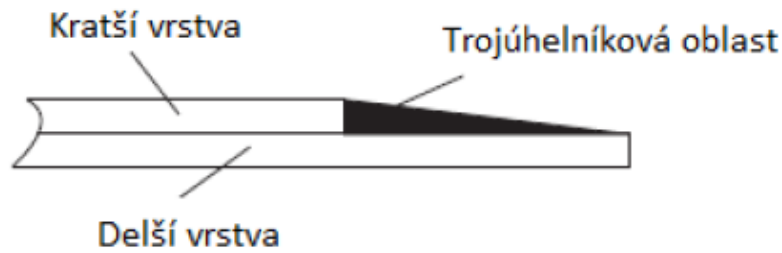
je znázorněno rozložení vnitřního napětí na pokles kapky; zvýšení přímého namáhání z tlustší oblasti na tenčí oblast, spolu se znázorněním vysokého smykového napětí mezi vrstvami. Mezilaminární smyková pevnost kompozitu závisí na jeho vlastnostech pryskyřice. První generace kompozitní pryskyřice byla vyrobena z čistého epoxidu, což je termosetový polymer. Vzhledem k tomu, že termosetové polymery jsou křehčí než termoplasty, nejsou interlaminární povrchy pryskyřičných kompozitů první generace schopny absorbovat větší množství lomové energie, což jim dává nízkou interlaminární pevnost. Druhé generace, například 8552, jsou vytvrzeny rozpuštěním termoplastu uvnitř epoxidu, čímž se zvyšuje lomová houževnatost materiálu a tím i jeho interlaminární pevnost. Pryskyřice třetí generace, jako je M21, si tento krok dále zachovávají zachováním další vrstvy nerozpuštěných termoplastických částic mezi vrstvami, se specifickým záměrem zlepšit interlaminární sílu [34]



Obr. 23 Struktura kompozitní listové pružiny [34]

Nejprve se ve vnitřní matrici objeví únavové trhliny k únavovému závěru složené listové pružiny. Únava trhliny se pravděpodobně objeví v oblastech trojúhelníku vyplněných maticovým materiálem. Oblasti trojúhelníku jsou pojmenovány společně jako únavově slabá oblast. Mezitím existuje několik oblastí, kde je slabá únava na průřezu každé kratší a delší vrstvy z důvodu přítomnosti gradientových vrstev v těle kompozitní listové pružiny.

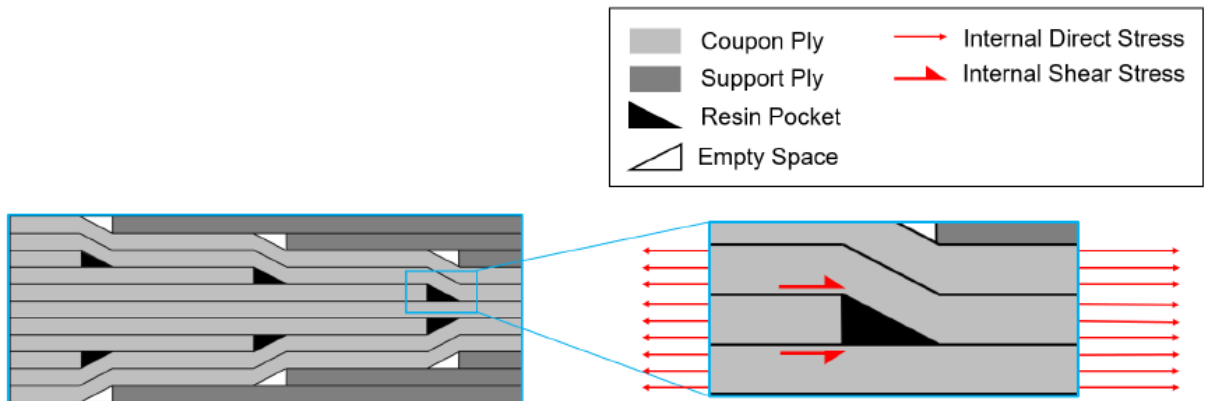




Obr. 24 Oblast trojúhelníku mezi kratší a delší vrstvou

Proces únavy nastává v předběžné fázi, trhliny se vyskytují v každé oblasti slabosti únavy a pak se navzájem spojují, jak se zvyšují únavové cykly, což vede k selhání delaminace. Vzhledem k tomu, že kompozitní listové pružiny jsou kritické pro bezpečnost, mělo by být považováno za únavové selhání při delaminaci selhání kompozitních listových pružin. Navrhovaná únavová závada parabolického kompozitu listové pružiny je popsána takto:

- (1) Úzká slabá oblast je na křižovatce delší a kratší vrstvy, a počáteční únavová trhlina nastane v slabém místě.
- (2) Trhlina z oblasti slabosti únavy se šíří se zvýšením únavového cyklu, což nakonec vede k delaminaci selhání kompozitní listové pružiny. [32,33]



Obr. 25 Schéma znázorňující uspořádání jednotlivých vrstev a rozložení napětí kolem rozhraní

[33]

## 3.2 Degradční procesy

Změny v polymerech rozdělujeme do několika základních skupin jako termodegradace, fotodegradace, mechanická degradace a biodegradace. Pokud je během procesu tepelné nebo světelné iniciace přítomen kyslík, lze hovořit o termooxidaci a fotooxidaci. V neposlední řadě může dojít ke změně nadmolekulární struktury, která také ovlivňuje životnost materiálu. [24]

### 3.2.1 Termodegradace

Jeden z hlavních zdrojů problémů, při zpracování polymerů, pochází z vysoké viskozity taveniny polymerů. Většina průmyslových termoplastických polymerů, jsou zpracovávány v teplotním intervalu 400–650 K. Je zřejmé, že zpracování v intervalu 800–1000 K, kde se očekává, že viskozita je obvykle 10 až 1000krát nižší, by minimalizovala mnoho důležitých technologických a ekonomických omezení. Bohužel, to není možné, protože polymery jsou při těchto teplotách tepelně nestabilní. Zpracovatelské činnosti jsou vždy prováděny v teplotních oblastech, kde viskozita taveniny je poměrně vysoká, těsně pod  $t_0$ , což lze také nazývat maximální teplotou, při které je materiál ještě stabilní. Podstatným kritériem je však difúzní hranice: není přesně stanoven diskretní práh degradačních procesů. To znamená, že optimální podmínky zpracování se obecně týkají malé části strukturální integrity makromolekul. Tepelným účinkem vyvolaný rozpad polymeru v inertní atmosféře nebo vakuu. Během tohoto procesu dochází ke vzniku těkavých produktů a nedefinovatelného uhlíkového zbytku. Důvodem zkoumání termodegradace je samotné zpracování materiálů, kdy se často dosahují teploty v rozmezí od 200 ° C do 300 ° C. Samotný rozklad se během tohoto procesu nemusí nějak výrazně projevit, ale vznikají poruchová centra, které jsou příčinou následných reakcí. Pod pojmem tepelné stárnutí lze vnímat proces probíhající během výrazně nižších teplot než při tepelném rozkladu. Jde o dlouhodobý proces, během kterého nastávají změny jako na molekulární úrovni, tak na nadmolekulární struktuře. Tepelná odolnost polymerů je z velké části úzce spjata s pevností vazeb nacházejících se v polymerech. Odbourávání může probíhat dvěma způsoby. [24,25]

- **Statistické štěpení** – Sled jednotlivých štěpných reakcí na různých místech řetězce
- **Depolymerace** – Rozklad makromolekul, při kterém dochází ve velké míře ke vzniku monomerů. Tento typ rozpadu probíhá jen u malé skupiny materiálů.

### 3.2.2 Fotodegradace

Polymerní materiály jsou citlivé na ultrafialový podíl slunečního záření vyvolávajícího obdobné reakce jako tepelná energie. Dochází ke trhání řetězců, zesíťování a aktivaci oxidačních reakcí. Podmínkou fotodegradačních procesů je pohlcování záření. Polymery jsou citlivé i na jiné druhy záření než rentgenové, gama a kosmické, při čemž se na degradaci z největší míry podíly UV, vlivem kterého dochází k trhání makromolekul, tvorbě radikálů, případně zesíťování. Celý proces probíhá z větší míry statistickým štěpením. [24]

### 3.2.3 Mechanická degradace

Způsobuje změnu molekulární a nadmolekulární struktury, čímž ovlivňuje vlastnosti polymeru. Ke štěpení dochází v momentě, kdy se ve hmotě nahromadí vyšší napětí než pevnost kovalentní vazby. Degradacnímu mechanismu podléhají pevné materiály například během mletí, také však nastává u tavenin během běžného zpracování polymerů a v roztocích během míchání nebo průtokem roztoku kapilárami. V momentě, kdy se poruší vazba vzniká volný radikál. Nejvíce štěpných reakcí nastává za snížených teplot, se stoupající teplotou jejich množství klesá z důvodu vyšší ohebnosti řetězců a poklesu smykových sil. Jako první degradují delší řetězce a trhání probíhá, dokud není jejich délka kritická. U semikrystalických polymerů se trhají přednostně řetězce v amorfní fázi. V první fázi vznikají radikály v místě přerušení makromolekuly. Vzhledem ke své reaktivitě reagují se sousedním řetězcem za vzniku nového radikálu, který se nyní již nachází na řetězci. [24,26]

### 3.2.4 Změny nadmolekulární struktury

Během degradačních procesů dochází ke změně mechanických vlastností, rozpustnosti, teploty tání, k tvarovým a rozměrovým změnám, a v některých případech ke změně zpracovatelnosti. Pod teplotou tání krystalického podílu jsou polymery s pravidelným uspořádáním řetězců schopné krystalizace. Její rychlost přímo závisí na teplotě a množství nepravidelností řetězců, případně nečistot nacházejících se u polymerů. Tyto závady způsobují snížení  $T_m$  a také způsobují snížení podílu krystalické fáze. Vznik krystalizačních zárodků je přímo spjat s mechanismem, kinetikou krystalizace a ve značné míře z průběhu chlazení. Z reálné praxe je zřejmé, že úplné krystalizace se u žádného polymeru nedá dosáhnout. Samotný krystalizační proces lze rozdělit na dvě fáze

- **Primární** – je definována rovnovážným stavem hustoty.

- **Sekundární** – projevuje se v případech, kdy se během primární fáze nedosáhne konečné hranice a krystalizace probíhá dále, což je charakterizováno zvýšením hustoty. Stárnutí materiálu, u kterého probíhá tento proces je závislé na jeho rychlosti, která je asi o dva řády nižší než rychlost primární krystalizace. Zapříčiňuje fyzikální, tvarové změny a vznik trhlin. [24, 26]

### 3.2.5 Biodegradace

Biodegradace je jedním z typů degradace. Pod tímto pojmem se rozumí degradační procesy, které jsou vyvolány působením mikroorganismů, hmyzem či hlodavci a vedou k částečné nebo úplné destrukci polymeru, nebo až k úplné metabolické přeměně na nízkomolekulární produkty jako  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$ . Během této fáze je mikroby využívána většina abiotických oxidačních produktů. Důležitým aspektem je nepřetržitý růst mikroorganismů. Biodegradace může být nežádoucí, např. v případě kabelů uložených v zemi, nebo žádoucí, při likvidaci polymerních odpadů. [40]

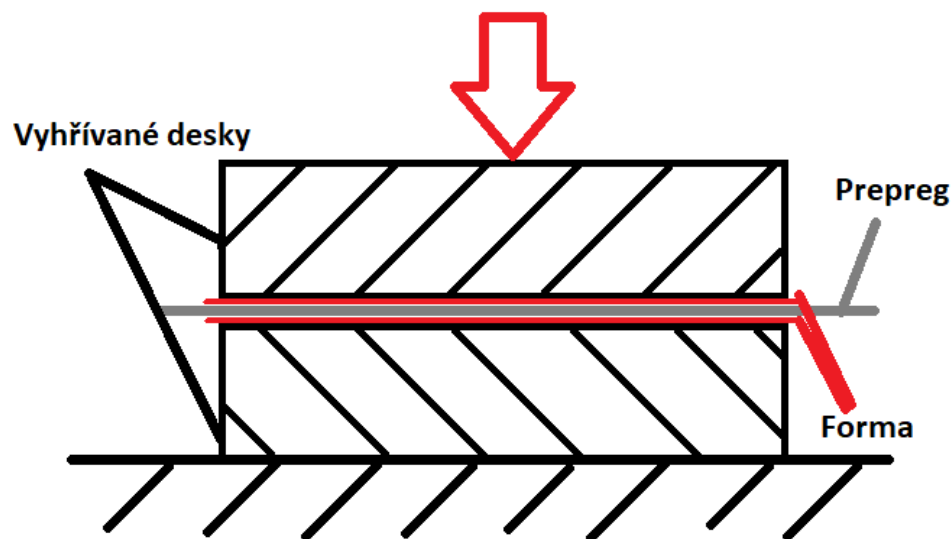
## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Zkušební tělesa byla vyráběna technologií lisování mezi vyhřívanými deskami. Tato technologie se využívá pouze pro malé zakázky, nebo přímo na zkušební tělesa. Výrobky dosahují dobré kvality povrchu i velmi dobrých mechanických vlastností.

### 4.1 Postup výroby

Jako technologie výroby zkušebních těles byla využita technologie lisování mezi vyhřívanými deskami, kde se musí desky nechat nejdříve nahřát na předem určenou teplotu, při které bude lisování prováděno. Před samotným lisováním je zapotřebí si předpřipravit prepreg, který spočíval v ručním skládání vrstev na sebe po směru vlákna. Tyto prepregy byly vyrobeny celkově ve třech modifikacích.



Obr. 26 Schéma lisování mezi vyhřívanými deskami

#### 4.1.1 Příprava před lisováním

Před lisováním je nutno si připravit předem určené množství materiálu, aby se dal vrstvit budoucí prepreg. Tyto odstřížky se stříhají z velké role materiálu, který je před použitím zmražen na  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , aby nedošlo k degradaci tohoto materiálu. Rozmražený materiál jsem stříhal ve výšce 26 mm po pásech, které jsem pak stříhal na předem určenou modifikaci skládání vrstev.



*Obr. 27 Ukázka nastříhaných pásů a jednotlivých odstřížků před lisováním*



*Obr. 28 Ukázka jedné z modifikací před vložením do lisu*

#### 4.1.2 Podmínky při lisování

Teplota vrchní desky	150°C
Teplota spodní desky	150°C
Čas lisování	15 min



Obr. 29 Příklad lisování mezi vyhřívanými deskami

#### 4.2 Příprava zkušebních těles k měření

Pro zjištění mechanických vlastností a rozlišností při kladení vrstev byly zhotoveny 3 typy zkušebních těles z jednoho typu materiálu metodou lisování mezi vyhřívanými deskami, kde všechny tři jsou namáhány na tah. Pro únavové chování pak byly zhotoveny 3 sady zkušebních těles, které budou namáhány dynamicky v tahu.



#### 4.2.1 Použitý materiál

Mezi dostupnými materiály byl zvolen skelný prepreg s označením **Deltapreg VV430U-DT806R 34 % (H 124 cm)**, který je dodáván italskou firmou Delta. Tento materiál má jednosměrnou kontinuální výztuž ze skelných vláken, kde je hmotnostní obsah epoxidové pryskyřice 34 %. Tento materiál má pevnosti v ohybu  $\sigma_o=818$  MPa a modul pružnosti je  $E = 37\,400$  MPa.

#### 4.2.2 Modifikace vrstvení prepregů

##### 4.2.2.1 Vzorek č.1

Jako první byly zhotoveny zkušební vzorky z 5 vrstev odstřížků bez jakýchkoliv překladů v kontinuálních vrstvách po směru vlákna. Tyto vzorky budou namáhány na tah a to staticky a dynamicky.

Tab. 4 Rozměry vzorku 1.modifikace

Délka-L[mm]	Šířka-b[mm]	Tloušťka – a[mm]
160	20	1,6



Obr. 30 Schéma vrstvení u nepřekládaného vzorku č.1

##### 4.2.2.2 Vzorek č.2

U druhé modifikace byly vrstvy kladeny v podélném směru. Kde přesně v prostřední vrstvě je mezera. I u těchto vzorků se budou následovně měřit mechanické vlastnosti v tahu a únavové chování v cyklickém tahu.

Tab. 5 Rozměry vzorku 2.modifikace

Délka-L[mm]	Šířka-b[mm]	Tloušťka- a[mm]
160	20	1,6



Obr. 31 Schéma vrstvení u vzorku č.2

#### 4.2.2.3 Vzorek č.3

Při třetí modifikaci byly jednotlivé odstřížky překládány podle schématu (obr. 31), kde vnější vrstvy jsou souměrné a jedna vrstva byla vrstvena přes další, tak aby vznikl na rozhraní trojúhelník.

Tab. 6 Rozměry vzorku 3. modifikace

Délka-L[mm]	Šířka-b[mm]	Tloušťka- a[mm]
160	20	1,6



Obr. 32 Schéma vrstvení u vzorku č.3

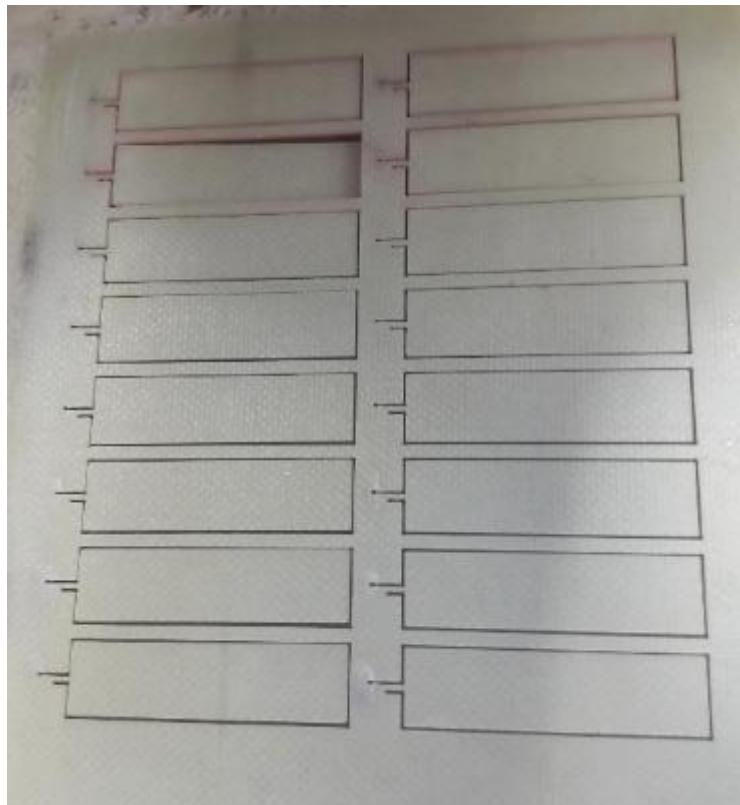
#### 4.2.3 Řezání zkušebních těles

Z důvodu řezání zkušebních těles muselo být použito technologie řezání vodním paprskem, u konvenčních metod řezání se pracuje s vyššími teplotami, a to je u kompozitních materiálů nežádoucí. U technologie řezání vodním paprskem je hlavní veličinou tlak paprsku, proto zde nevzniká vysoká teplota.

##### 4.2.3.1 Řezání materiálu vysokotlakým vodním paprskem

Hlavní podstatou této metody je dělení materiálu principem obrušování děleného materiálu tlakem za pomoci vodního paprsku. Pracovní tlak vody se pohybuje v rozmezí 800–4100 Bar. Hlavním tlakovým zdrojem jsou vysokotlaká čerpadla, která mají příkon 9–75 kW a průtok vody 1,2 – 7,6 l/min. Vodní paprsek je soustředěn v řezací hlavě, který je zakončen vodní tryskou. Pohyb řezací hlavy, tedy i celá dráha řezu, je řízena CNC stroji podle předem určeného programu. Je možné provádět i tvarově složitější řezy během jedné operace.

Standartní přesnost výřezu je  $\pm 0,2$  mm/m. Materiál, který je dělen, není silově namáhán, tudíž řezná hrana není nijak tepelně namáhána. U dělení vodím paprskem se vždy jedná o studený řez. Tato skutečnost bývá hlavním faktorem, která odlišuje vodní paprsek od technologií ostatních, zvláště pak od mikroplazmy či laseru. Po provedení řezu se směs vody a případně abraziva zachycuje v lapači, který je umístěn pod řezaným materiálem.



*Obr. 33 Ukázka nařezaných zkušebních těles*

## 5 EXPERIMENTÁLNÍ ZJIŠTĚNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

### 5.1 Statická zkouška tahem

Abychom mohli porovnávat únavové chování, musíme nejprve zjistit materiálové vlastnosti pomocí statické zkoušky v tahu. Z této zkoušky zjistíme veličiny jako jsou modul pružnosti v tahu, mez pevnosti a maximální sílu potřebnou k přetržení. Tyto zkoušky probíhaly v prostorách Univerzity Tomáše Bati v laboratoři na Fakultě aplikované informatiky. Zkušební stroj byl použit Vibrophore 1000 značky Zwick/Roell. Tento stroj představuje poslední generaci vysokofrekvenčních pulsátorů. Lze jej využít i jako plnohodnotný statický testovací stroj a také slouží k testování únavové životnosti. Vyhodnocení probíhalo za pomoci softwaru TestXpert.

Parametry stroje Vibrophore 1000:

- Maximální síla: 1000kN
- Maximální amplituda síly: 500kN
- Maximální oscilační posun: 4 ( $\pm 2$ ) mm
- Testovací frekvenční rozsah: 30-285 Hz
- Maximální testovací výška: 2005mm



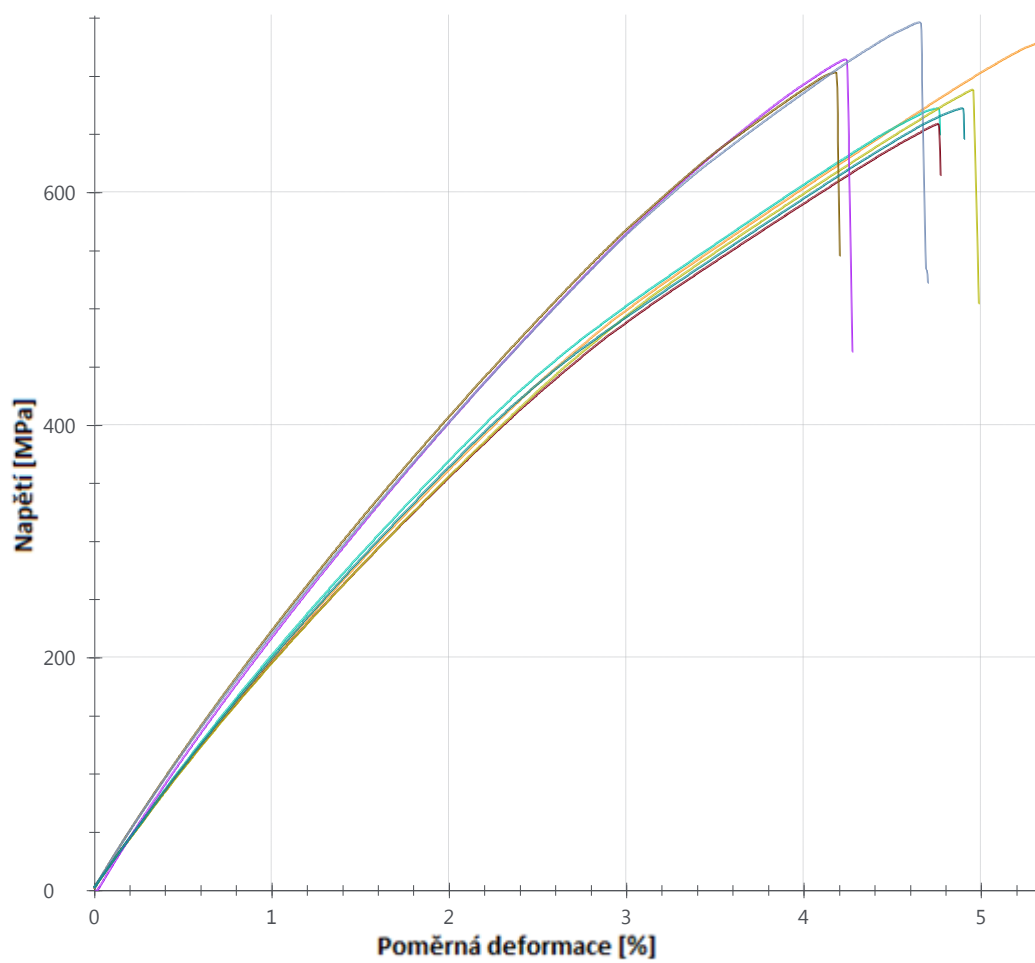
Obr. 34 Zkušební stroj pro statické i dynamické zatěžování Vibrophore 1000

### 5.1.1 Vzorek č.1

U zkušebních těles vzorku č. 1 bylo vrstvení provedeno podle schématu (Obr. 30), kde vrstvení bylo souměrně podélné. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce (Tab. 7).

Tab. 7 Naměřená a vyhodnocená data pro vzorky č.1

Vzorek č.1 n=8	$E$ [MPa]	$\sigma_{Fmax}$ [MPa]	$F_{max}$ [N]	$\varepsilon_{Fmax}$ [%]	$W_{Fmax}$ [N.mm <sup>2</sup> ]
Těleso 1.1	24800	728,46	23078	5,3	-
Těleso 1.2	25100	672,1	21292	4,8	-
Těleso 1.3	24700	658,96	20876	4,8	-
Těleso 1.4	23600	688,23	21809	5	-
Těleso 1.5	24500	714,19	22854	4,2	35500,1
Těleso 1.6	24400	703,24	22504	4,3	35004,4
Těleso 1.7	24000	746,09	23875	4,4	41845,3
Těleso 1.8	22900	672,25	21297	4,2	-
Průměr	24250	697,94	22197,4	4,63	37449,96
Směrodatná odchylka	672,68	28,46	977,70	0,38	3114,569
Variační koeficient [%]	2,77	4,08	4,40	8,29	8,32



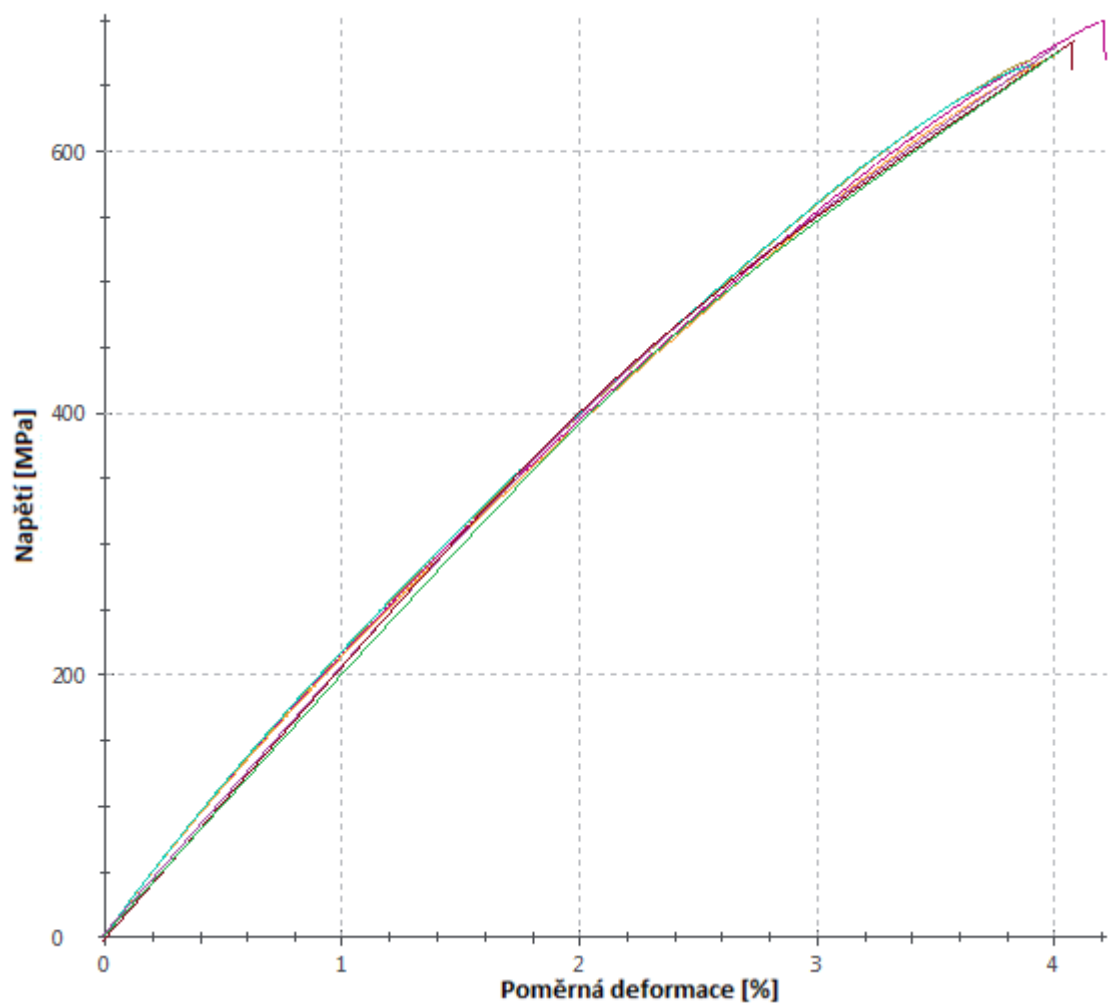
Obr. 35 Závislost napětí na poměrné deformaci pro vzorky č.1

### 5.1.2 Vzorek č.2

Zkušební tělesa vzorku č. 2 jsou vrstvena dle schématu (Obr. 31). Toto vrstvení je uprostřed narušeno mezerou dané vrstvy. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce (Tab. 8).

Tab. 8 Naměřená a vyhodnocená data pro vzorky č.2

Vzorek č.2 n=8	$E$ [MPa]	$\sigma_{Fmax}$ [MPa]	$F_{max}$ [N]	$\varepsilon_{Fmax}$ [%]	$W_{Fmax}$ [N. mm <sup>2</sup> ]
Těleso 2.1	23700	699,33	22378	4,2	34533,73
Těleso 2.2	23800	669,45	21422	3,9	30398,45
Těleso 2.3	23500	672,97	21535	4	31355,62
Těleso 2.4	23800	665,49	21296	3,9	30314,31
Těleso 2.5	23700	698,95	21969	4	31543,12
Těleso 2.6	23800	672,53	21568	3,9	32420,42
Těleso 2.7	23500	668,18	21356	3,8	30576,64
Těleso 2.8	23700	697,58	22035	3,8	32845,15
Průměr	23687,5	680,56	21694,88	3,938	31748,43
Směrodatná odchylka	116,59	14,17	361,86	0,12	1362,945
Variační koeficient [%]	0,49	2,08	1,67	3,01	4,29



Obr. 36 Závislost napětí na poměrné deformaci pro vzorky č.2

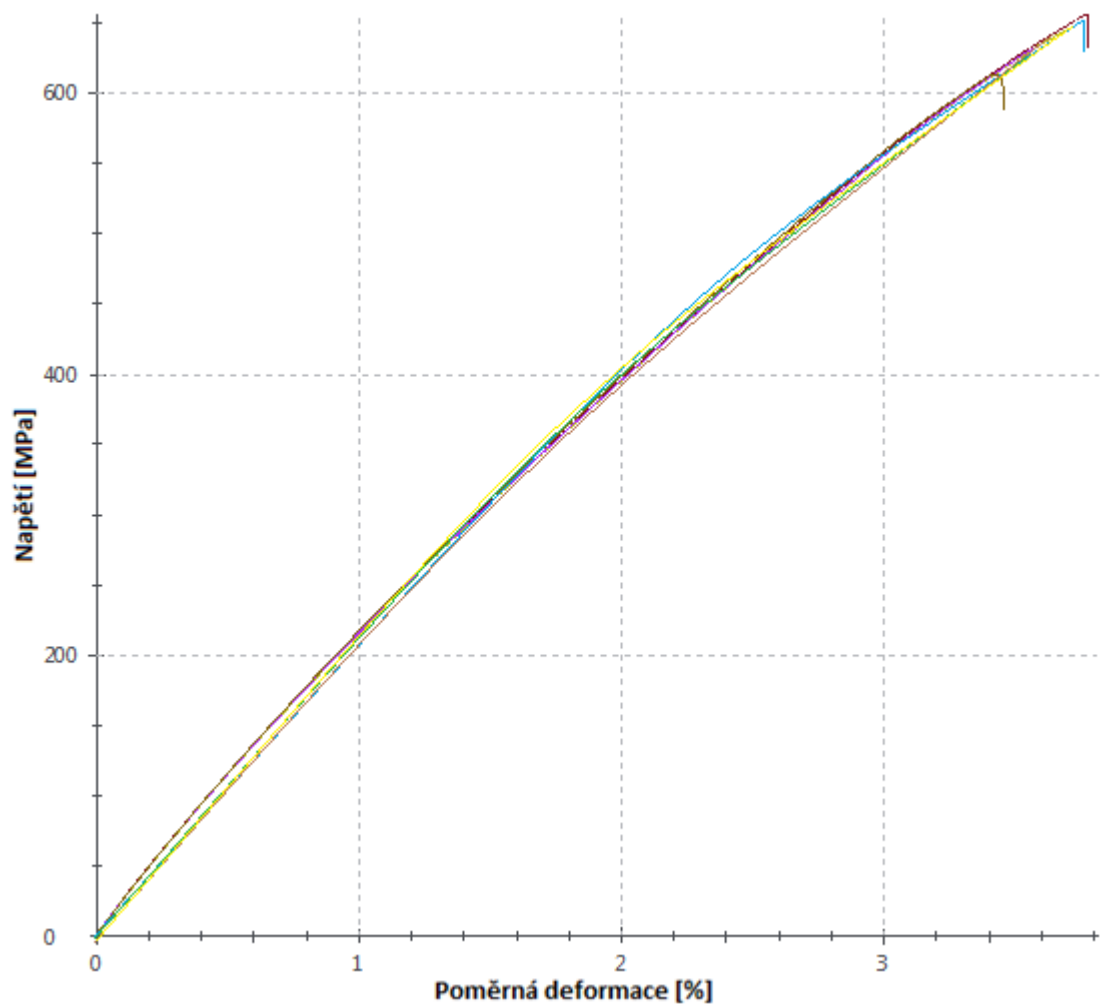


### 5.1.3 Vzorek č.3

Zkušební tělesa u vzorků č. 3 byly vrstveny dle schématu (Obr. 32). U tohoto vrstvení bylo cílem, aby vznikl na rozhrání trojúhelník a tak proběhla simulace parabolického vrstvení. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce (Tab. 9)

Tab. 9 Naměřena a vyhodnocená data pro vzorky č. 3

Vzorek č.3 n=3	$E$ [MPa]	$\sigma_{Fmax}$ [MPa]	$F_{max}$ [N]	$\varepsilon_{Fmax}$ [%]	$W_{Fmax}$ [N. mm <sup>2</sup> ]
Těleso 3.1	23700	656,03	20993	3,8	28581,56
Těleso 3.2	23600	643,75	20600	3,7	27285,92
Těleso 3.3	23600	632,84	20251	3,6	26013,76
Těleso 3.4	23700	613,39	19629	3,4	23834,31
Těleso 3.5	23500	631,39	19826	3,6	28423,35
Těleso 3.6	23700	642,83	20896	3,5	24586,42
Těleso 3.7	23600	633,27	20523	3,7	27135,25
Těleso 3.8	23700	655,98	20789	3,6	25627,84
Průměr	23637,5	638,73	20438,38	3,61	26436,05
Směrodatná odchylka	69,59	13,20	466,16	0,12	1611,89
Variační koeficient [%]	0,29	2,07	2,28	3,23	6,10



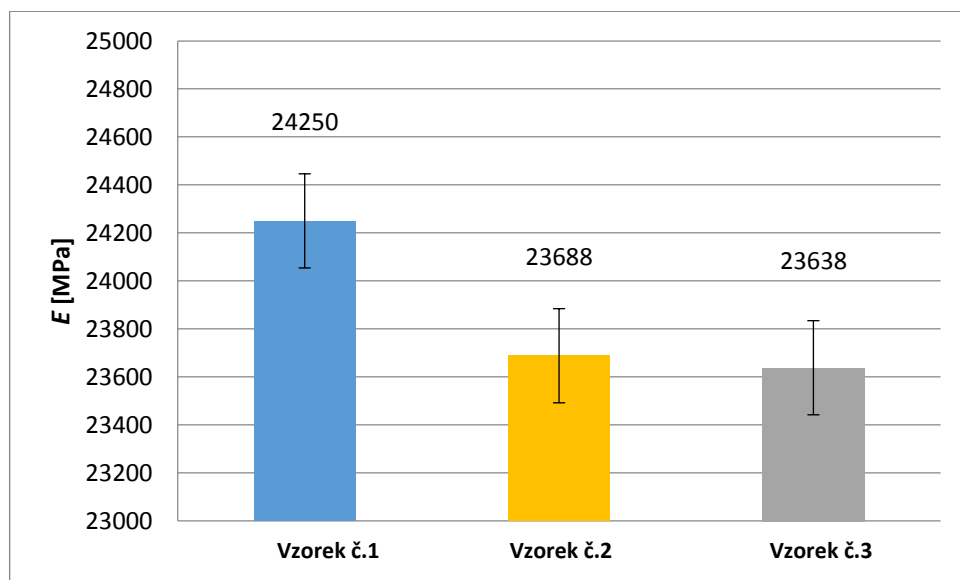
Obr. 37 Závislost napětí na poměrné deformaci pro vzorky č. 3

## 5.2 Porovnání mechanických vlastností vzorků č. 1, č. 2 a vzorků č.3

V tabulce (Tab. 10) jsou výsledné průměrné hodnoty jednotlivých skupin zkušebních vzorků, kde mezi uvedené hodnoty patří modul pružnosti v tahu, mez pevnosti v tahu a maximální síla. Nejlepších výsledků opět dosahovaly vzorky č. 1, kde u těchto vzorků nebylo použito žádné překládání jednotlivých vrstev. Rozměry zkušebních těles byly 160x20mm.

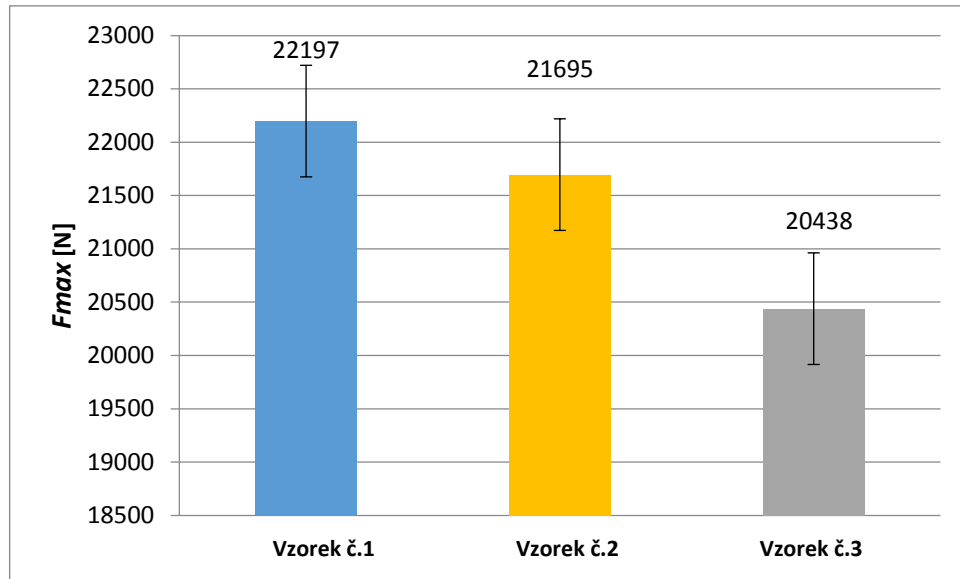
Tab. 10 Výsledné hodnoty pro jednotlivé vzorky u zkoušky statického tahu

Vzorek	$E$ [MPa]	$\sigma_{Fmax}$ [MPa]	$F_{max}$ [N]
Vzorek č.1	24250,0 ± 672,68	697,94 ± 28,46	22197,40 ± 977,70
Vzorek č.2	23687,5 ± 116,59	680,56 ± 14,17	21694,88 ± 361,86
Vzorek č.3	23637,5 ± 69,59	638,73 ± 13,20	20438,38 ± 466,16



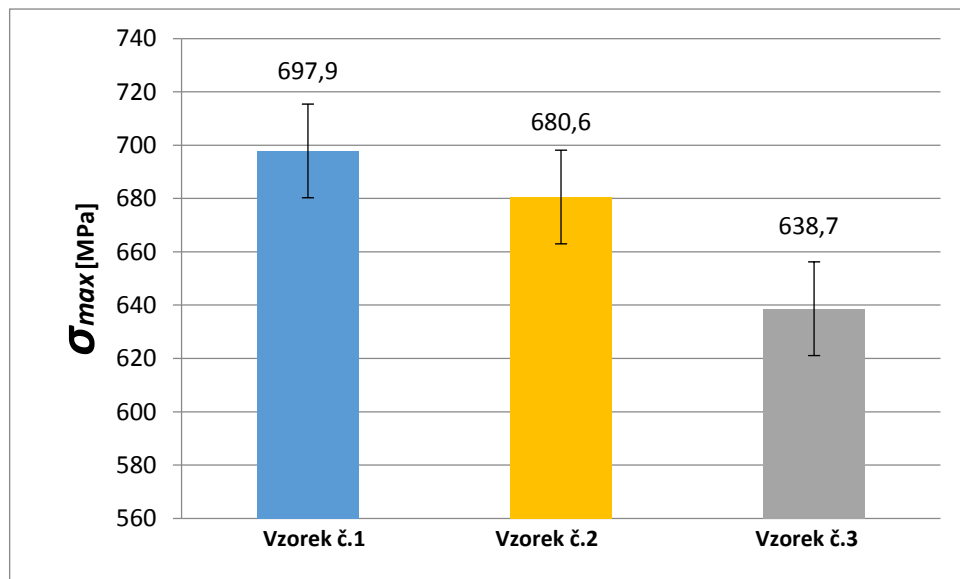
Obr. 38 Grafické znázornění hodnot modulu pružnosti v tahu

Modul pružnosti v tahu vyšel nejvyšší u skupiny vzorků č. 1, kde hodnota  $E = 24250$  MPa byla vyšší o více než 500 MPa oproti dalším měřeným vzorkům.



Obr. 39 Grafické znázornění hodnot maximálních sil

U maximální síly, která je potřebná k přetržení zkušební vzorku lze vidět, že i zde vykazují vzorky č.1 vyšších hodnot. Rozdíl mezi vzorky č.1 a vzorky č.3 je necelých 2000 N.

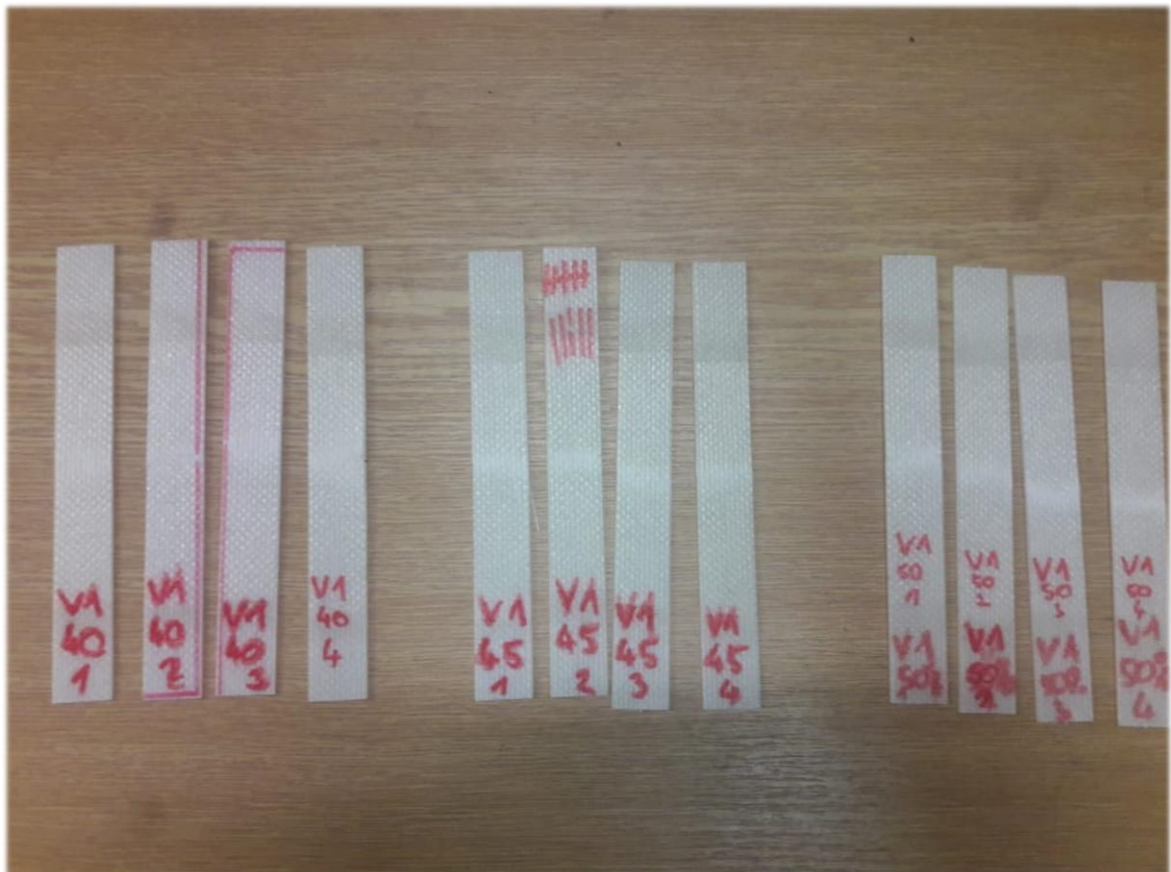


Obr. 40 Grafické znázornění hodnot mezí pevností v tahu

I u meze pevnosti v tahu je u vzorků č.1 je hodnota nejvyšší. U dalších vzorků je mez pevnosti v tahu menší, a to v řádech desítek MPa.

### 5.3 Shrnutí mechanických vlastností v tahu

U tohoto zhodnocení lze jasně vidět, že vrstvení prepregů překládáním má jasný vliv na mechanické vlastnosti daného materiálu. Jelikož jen u vzorků č.1 jsou vrstvy kladeny rovnoměrně na sebe po směru hlavního vlákna, mají tyto vzorky všechny hodnoty vysoké oproti vzorkům ostatním. U dalších vzorků lze jasně vidět, že dosahují horších vlastností, a to u všech měřených hodnot těchto zkušebních těles, a to je v praxi nepříznivý vliv pro aplikaci takto překládaných vrstvení. Nutno podotknout, že k přetržení došlo vždy v místě překladů.



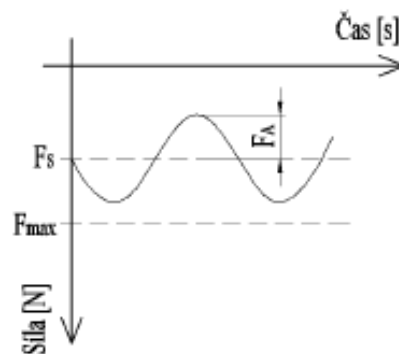
Obr. 41 Jednotlivé vzorky po statických zkouškách

## 6 EXPERIMENTÁLNÍ ZJIŠTĚNÍ DYNAMICKÉHO NAMÁHÁNÍ

Dynamická zkouška byla prováděna taktéž jako statická zkouška v tahu v laboratoři na Fakultě aplikované informatiky. I pro tyto zkoušky byl použit zkušební stroj Vibrophore 1000. Tento stroj plně vyhovuje zkouškám cyklického namáhání. Zkoušky byly prováděny cyklickým zatížením v tahu. Parametry stroje jsou uvedeny v kapitole 5.2.

### 6.1 Parametry zkoušky

Před samotným provedením zkoušky bylo pomocí softwaru TestXpert v programu test controller simulováno měření, kde si stroj sám vyhodnotil, jaká frekvence bude pro měření optimální. Zatížení pak bylo zadáváno dle hodnot statické zkoušky.



Obr. 42 Průběh zatěžování je sinusový

Tab. 11 Parametry pro zatěžování vzorků č.1

Vzorek č.1	50 %	45 %	40 %
Horní mez zatěžující síly	11100 N	9990 N	8880 N
Dolní mez zatěžující síly	200 N	200 N	200 N
Frekvence	33,3 Hz	33,2 Hz	33,2 Hz

Tab. 12 Parametry pro zatěžování vzorků č.2

Vzorek č.2	50 %	45 %	40 %
Horní mez zatěžující síly	10847 N	9763 N	8678 N
Dolní mez zatěžující síly	200 N	200 N	200 N
Frekvence	33,1 Hz	33,1 Hz	33,1 Hz

Tab. 13 Parametry pro zatěžování vzorků č.3

Vzorek č.3	50 %	45 %	40 %
Horní mez zatěžující síly	10219 N	9197 N	8176 N
Dolní mez zatěžující síly	200 N	200 N	200 N
Frekvence	33,1 Hz	33,1 Hz	33,1 Hz

## 6.2 Dynamická zkouška tahem

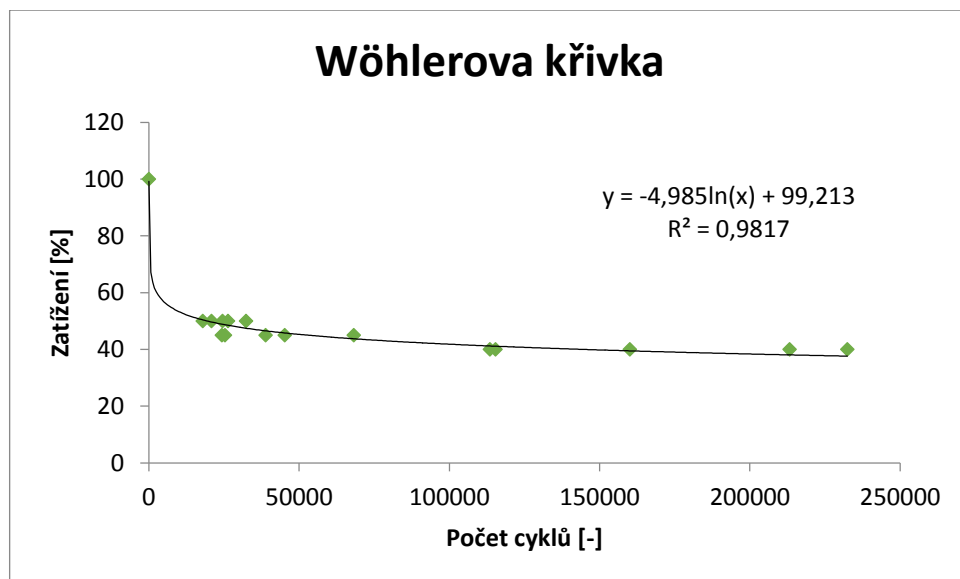
Při měření cyklů byl vždy zkušební vzorek vystaven předem danému zatížení a byl vždy testován na maximální počet cyklů dosažených k přetržení daného zkušebního vzorku. Po přetržení vzorku byl zapsán počet dosažených cyklů. Zatěžování probíhalo na 50 %, 45 % a 40 % z maximální zatěžující síly dosažené statickou zkouškou.

### 6.2.1 Vzorek č.1

U vzorků č. 1 probíhalo zatěžování z  $F_{max} = 22\,200\text{ N}$ . Zatěžování probíhalo ve třech hladinách.

Tab. 14 Tabulka počtu cyklů při daném zatížení pro vzorky č.1

Vzorek č.1							
Zatížení	Hodnota	Počet cyklů					Průměr
50 % $F_{max}$	11100 N	26333	32331	17929	24508	20838	24388
45 % $F_{max}$	9990 N	38844	45210	25317	68189	24293	40371
40 % $F_{max}$	8880 N	113500	213241	232451	115368	160076	166927



Obr. 43 Wöhlerova křivka pro vzorky č.1

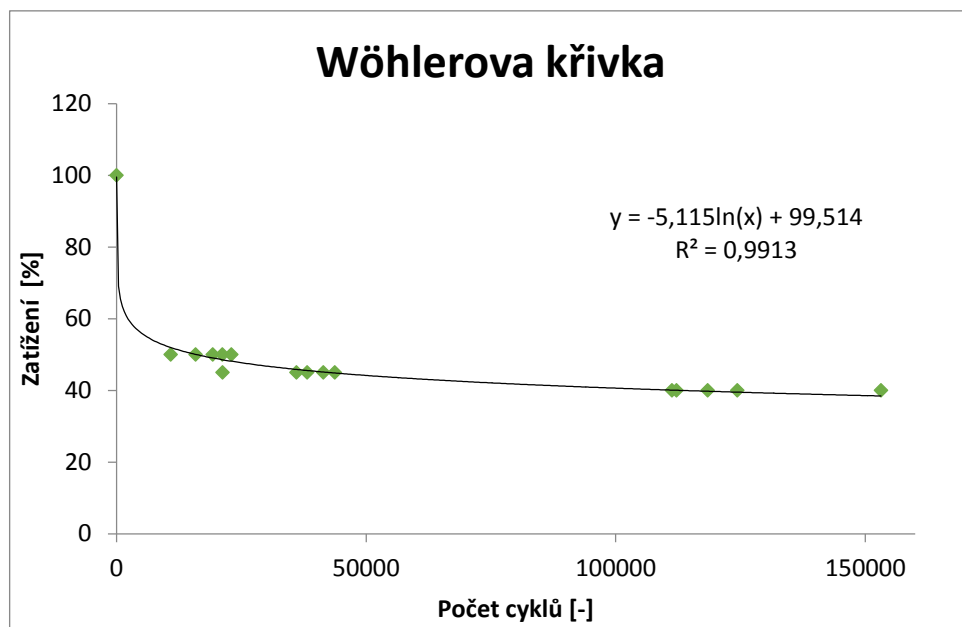
Na Wöhlerově křivce pro vzorky č.1 lze vidět závislost zatížení na počtu cyklů, které tyto vzorky dosáhly před porušením.

### 6.2.2 Vzorek č.2

Vzorky č.2 byly zatěžovány z  $F_{max} = 21694$  N. Tyto vzorky byly taktéž zatěžovány ve třech hladinách.

Tab. 15 Tabulka počtu cyklů při daném zatížení pro vzorky č.2

Vzorek č.2							
Zatížení	Hodnota	Počet cyklů					Průměr
50 % $F_{max}$	10847N	19280	21204	23005	10854	15845	18038
45 % $F_{max}$	9763 N	21238	43724	41424	38190	36045	36124
40 % $F_{max}$	8678 N	111264	153140	118420	112170	124356	123870



Obr. 44 Wöhlerova křivka pro vzorky č.2

Wöhlerova křivka životnosti nám ukazuje kolik vydržely vzorky č.2 cyklů před porušením.

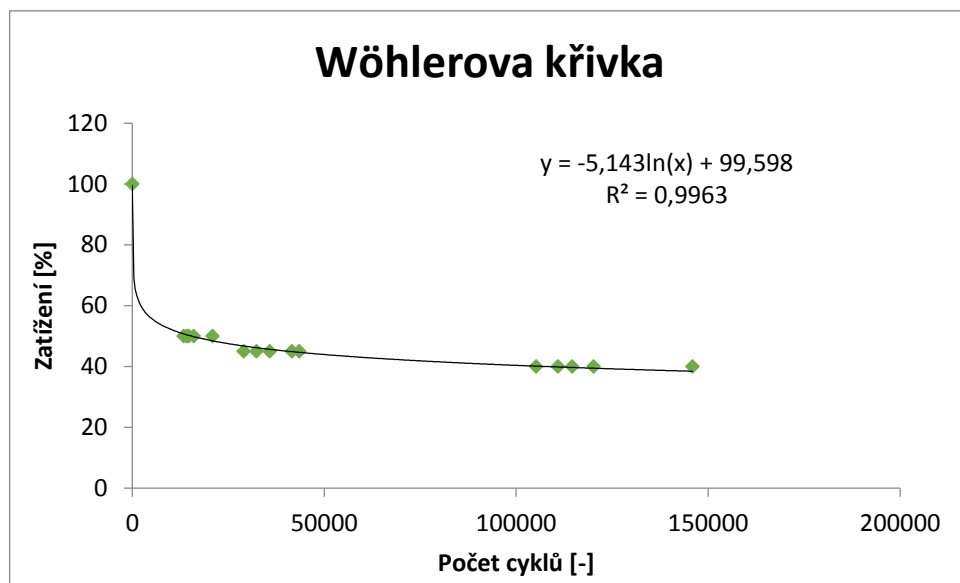


### 6.2.3 Vzorek č.3

Vzorky č.3 byly zatěžovány z  $F_{max} = 20438$  N. Tyto vzorky byly taktéž zatěžovány ve třech hladinách.

Tab. 16 Tabulka počtů cyklů při daném zatížení u vzorků č.3

Vzorek č.3							
Zatížení	Hodnota	Počet cyklů					Průměr
50 %	10219 N	20890	14120	13364	14689	15986	15810
45 %	9197 N	43474	35785	41568	29015	32329	36434
40 %	8176 N	145925	110875	105187	114585	120152	119345



Obr. 45 Wöhlerova křivka pro vzorky č.3

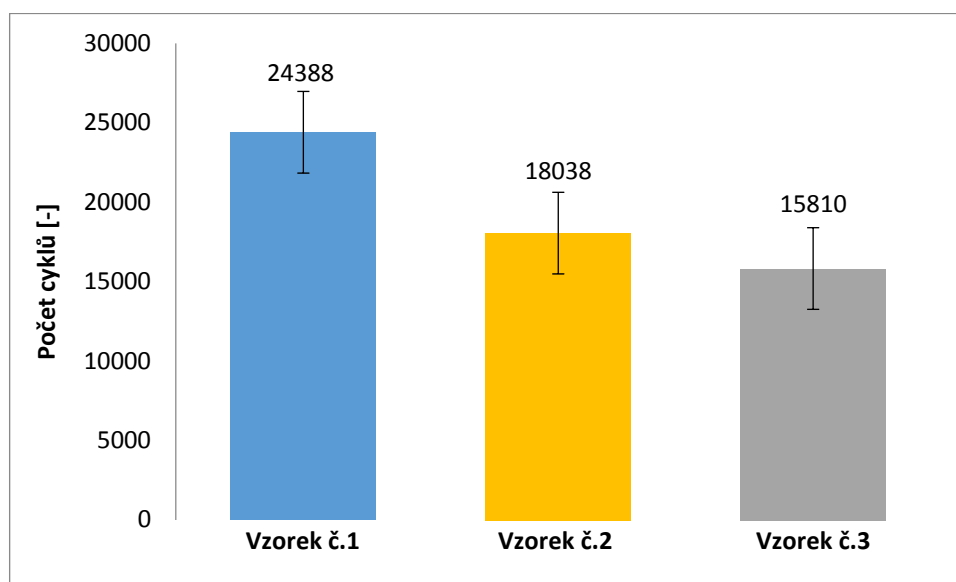
Wöhlerova křivka nám ukazuje závislost jednotlivých hladin zatížení na počtu cyklů, které vzorky vydržely do přetržení.

### 6.3 Porovnání jednotlivých zkušebních vzorků

V tabulce (Tab. 17) je znázorněno kolik vydržely dané skupiny vzorků cyklů při zatěžování na 50%, 45% a 40 % z  $F_{max}$ . Jak lze vidět hodnoty vzorků k porovnání vykazují znovu úplně jiné hodnoty než vzorky s vrstvením jednotlivých odstřížků překládáním.

Tab. 17 Hodnoty zatěžujících sil a počtu cyklů u jednotlivých vzorků při 50 % zatížení

	Zatěžující síla při 50 %	Průměrný počet cyklů při 50 %
Vzorek č.1	11100 N	24388
Vzorek č.2	10847 N	18038
Vzorek č.3	10219 N	15810

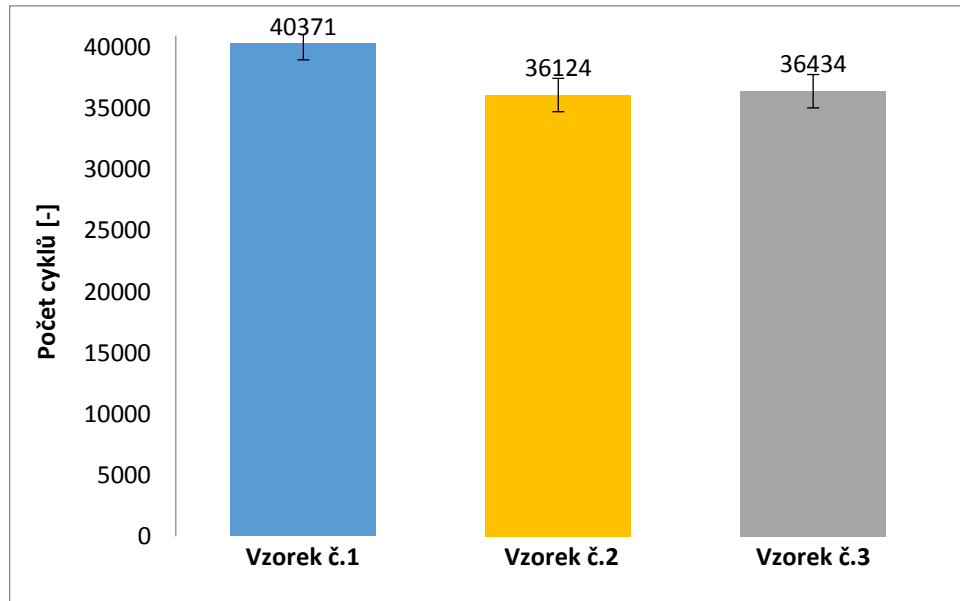


Obr. 46 Porovnání jednotlivých vzorků při zatížení 50 %  $F_{max}$

Jak lze vidět z grafu počtu cyklů pro zatížení na 50% z  $F_{max}$ , vzorek č.1 vydržel nejvíce cyklů a to o více než 5 000 cyklů oproti dalším testovaným vzorkům.

Tab. 18 Hodnoty zatěžujících sil a počtu cyklů u jednotlivých vzorků při 45 % zatížení

	Zatěžující síla při 45 %	Průměrný počet cyklů při 45 %
Vzorek č.1	9990 N	40371
Vzorek č.2	9763 N	36124
Vzorek č.3	9197 N	36434

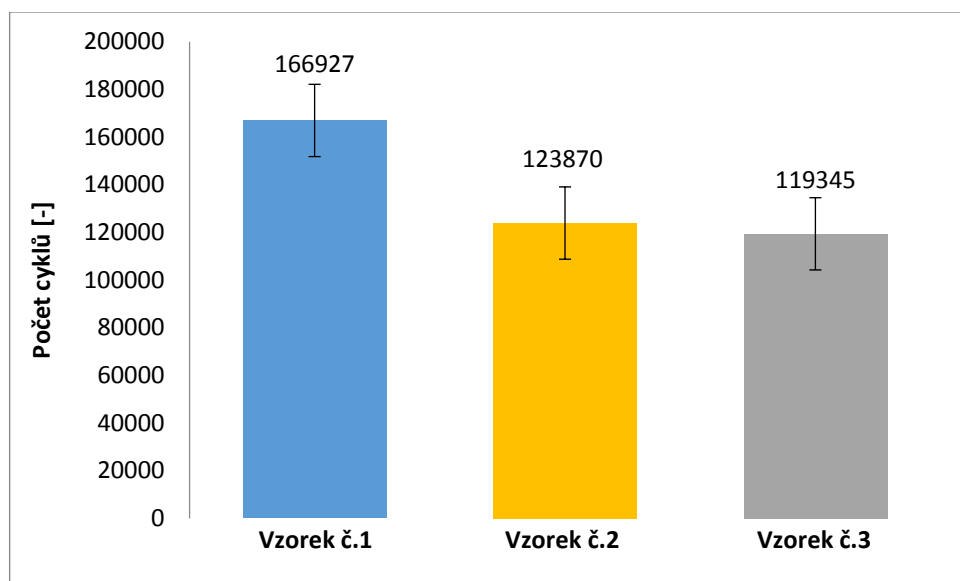


Obr. 47 Porovnání jednotlivých vzorků při zatížení 45 %  $F_{max}$

Při zatížení 45 % z  $F_{max}$  dosahovali zkušební tělesa okolo 40 000 cyklů, kde rozdíl mezi vzorky č.1 a vzorky č.2 byl něco málo přes 4 000 cyklů.

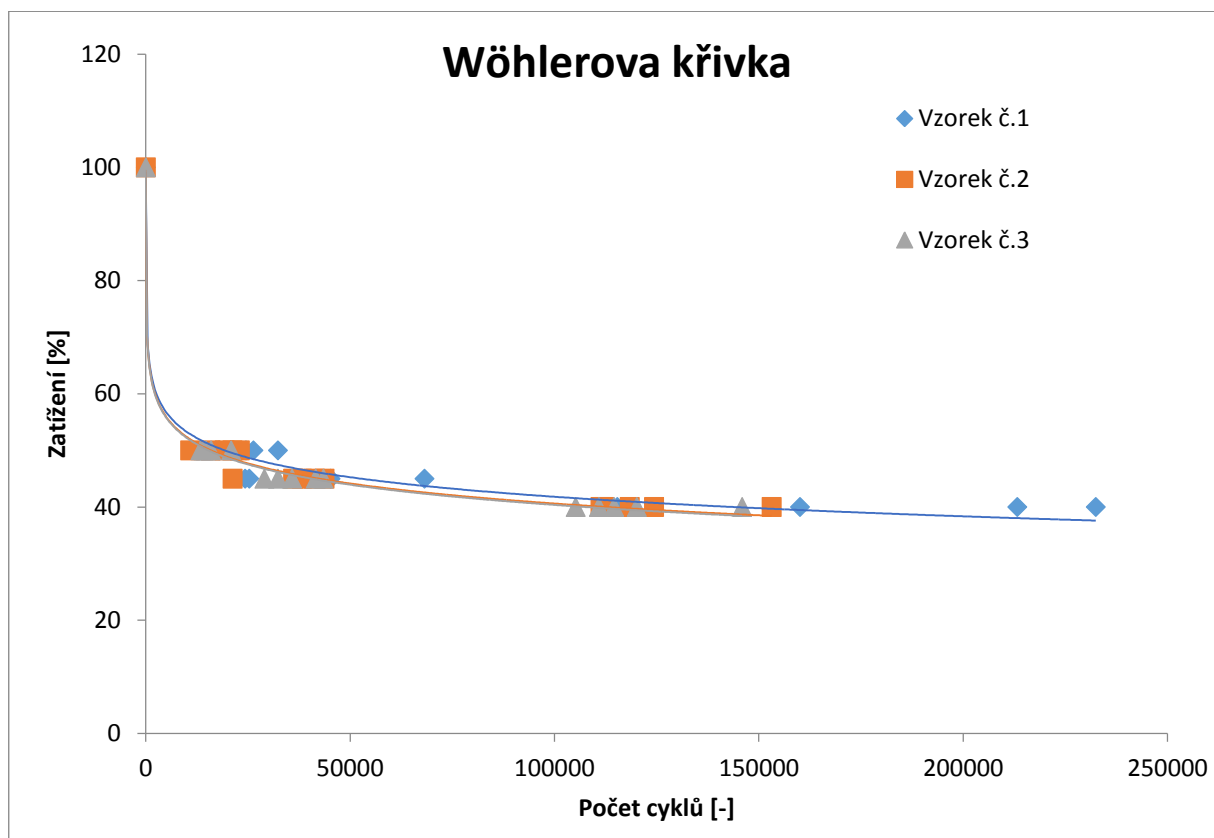
Tab. 19 Hodnoty zatěžujících sil a počtu cyklů u jednotlivých vzorků při 40% zatížení

	Zatěžující síla při 40 %	Průměrný počet cyklů při 40%
Vzorek č.1	8880 N	166927
Vzorek č.2	8678 N	123870
Vzorek č.3	8176 N	119345



Obr. 48 Porovnání jednotlivých vzorků při zatížení 40 %  $F_{max}$

Jak lze vidět z grafu na obrázku (Obr. 47) hodnoty vzorků č.1 s dalšími vzorky se už výrazně liší, tudíž je jasné vidět že překládání vrstev má vliv na únavové vlastnosti materiálu.



Obr. 49 Srovnání Wöhlerových křivek v závislosti zatížení na počtech cyklů

Na Wöhlerova křivce lze vidět porovnání jednotlivých křivek životnosti a jejich závislosti procentuálního zatížení z maximální síly k přetržení a počtu cyklů u zkušebních vzorků jednotlivých skupin.

#### 6.4 Shrnutí dynamických vlastností v tahu

Z provedených zkoušek a naměřených dat je zřejmé, že i zde má vrstvení odstřížků překládáním jasný vliv na životnost daného typu překládání. Vzorky č.2 se vzorky č.3 vykazovaly dosti podobné parametry při cyklickém zatěžování v jednotlivých hladinách. Vzorek č. 1 prokazoval při cyklickém namáhání nejlepší hodnoty a je to jednoznačně dáno tím, že u této zkušební sady neproběhlo žádné vrstvení prepregů, protože zde nevznikalo žádné rozhraní v jednotlivých vrstvách a byly celistvé, oproti vzorkům č. 2 a vzorkům č.3.

## ZÁVĚR

Tato diplomová práce pojednává o problematice únavového chování u konstrukčních kompozitů a faktorech, které toto chování ovlivňuje v praktickém využití. Jako zkušební tělesa na porovnání jednotlivých vlastností materiálu byly vytvořeny celkem tři sady zkušebních vzorků. Faktorem, který tyto vlastnosti ovlivňuje, bylo zvoleno vrstvení jednotlivých odstřížků z prepregu způsobem překládání jednotlivých vrstev. Porovnáním jednotlivých vlastností a naměřených hodnot u zkušebních vzorků bylo zjištěno, jaký mají vliv dané modifikace na statické a dynamické využití v praxi.

Jako první byla provedena statická zkouška v tahu u vzorků č.1, č.2 a č.3. Z naměřených hodnot těchto vzorků bylo zjištěno, že vrstvení formou překládání má prokazatelný vliv na výsledné hodnoty jako je modul pružnosti, maximální síla či mez pevnosti v tahu jednotlivých vzorků. Vzorek č. 1, který byl vrstven bez překládání odstřížků rovnoměrně ve směru vlákna, měl prokazatelně nejvyšší hodnoty. Modul pružnosti v tahu u vzorku č. 1 byl naměřen 24 250 MPa, maximální síla 22 197 N a mez pevnosti v tahu pak 698 MPa. U modulu pružnosti a maximální síly byl rozdíl proti ostatním vzorkům v řádech stovek MPa a N, u meze pevnosti byl pak tento rozdíl v řádech desítek. Mezi vzorky č. 2 a vzorky č. 3 pak výsledky nebyly až tak rozdílné, avšak vzorky č. 3 vykazovaly dle dané modifikace překládání o něco vyšší hodnoty než u vzorků č. 2. Na tyto hodnoty měl pravděpodobně vliv umístění překladů, kde u vzorků č. 2 byla prostřední vrstva odstřížku porušena přesně uprostřed zkušebních vzorků. Dynamické namáhání a únavové vlastnosti daných vzorků probíhalo v tahu. Zkušební vzorky se cyklovaly na 50 %, 45 % a 40 % z maximální síly potřebné k porušení vzorku zjištěné ze statických zkoušek. Pro vzorky č.1 byly hladiny nastaveny z maximální síly 22 200 N, u vzorků č. 2 byly nastaveny z hodnoty 21 694 N a pro vzorky č.3 pak z maximální síly 20 438 N. Počet cyklů u vzorků č.1 byl při 50% zatížení v průměru 24 388, u vzorků č.2 byl průměrný počet cyklů 18 038 a u vzorků č.3 pak byl průměrný počet cyklů 15 810. Jak lze z těchto hodnot vidět, vzorky č. 1 vydrží při stejném procentuálním zatížení více cyklů než další dvě sady vzorků. U hladiny 45 % z maximálního zatížení byl průměrný počet cyklů 40 371 u vzorků č.1. U vzorků č.2 byl průměrný počet cyklů při stejném procentuálním zatížení 36 124. Průměrný počet cyklů u vzorků č.3 pak byl ve stejné hladině zatížení 36 434. U této hladiny lze z výsledků poznat, že průměrný počet cyklů u vzorků č.2 a vzorků č.3 jsou téměř stejné, avšak vzorky č.1 vykazují stále lepší hodnoty. Při nejnižší hladině zatížení 40 % byl zaznamenán výsledek 166 927 jako průměrný počet cyklů u vzorků č.1. Při měření vzorků č.2 byl zaznamenán

průměrný počet cyklů 123 870 a u vzorků č.3 byl průměrný počet cyklů 119 345. Při zatěžování při 50 % z  $F_{max}$  vykazují vzorky č. 2 a vzorky č. 3, 75% účinnost oproti vzorkům č.1. U hladiny zatížení 45 % pak vzorky č.2 a vzorky č. 3 vykazují oproti vzorkům č. 1 taktéž menší účinnost a to o 90 %. U poslední měřené hladiny zatížení 40% výsledky ukazují, že i zde jsou výsledné hodnoty lepší u vzorků č.1. Vzorky č.2 a vzorky č. 3 mají pak účinnost menší než 75 %. Z těchto výsledků lze prokazatelně tvrdit, že vrstvení jednotlivých odstřížků překládáním má jasný vliv jak na mechanické vlastnosti, tak i dynamické chování vzniklých prepregů.

Při aplikaci daných poznatků nutno brát zřetel na typ vrstvení překladů a snažit se o co nejmenší počet překládaných vrstev u některých typů konstrukčních řešení, jako jsou listové pružiny z kompozitního materiálu, kde je výhodné a důležité skládat co nejvíce vrstev souměrně na sebe, aby zde nevznikaly trhliny na rozhraní těchto vrstev a tato pružina tak vydržela co největší možné zatížení v praxi.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 9788086960296
- [2] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005, 190 s. ISBN 80-708-0568-4.
- [3] LIPTÁKOVÁ, Tatiana, Pavol A LEXY, Ernest GONDÁR a Viera KHUNOVÁ. *Polymérne konštrukčné materiály* [online]. EDIS, 2012 [cit. 2016-02-19]. ISBN 978-80-554-0505-6. Dostupné z: <http://kmi2.uniza.sk/wpcontent/uploads/2009/10/POLYMERY-Po-RECENZII.pdf>
- [4] MORAVČÍK, Roman, Marián HAZLINGER, Mária HUDÁKOVÁ, Maroš MARTINKOVIČ a Roman ČIČKA. *Náuka o materiáloch I*. [online]. Trnava: Alumni Press, 2010 [cit. 2016-02-19]. ISBN 978-80-8096-123-7. Dostupné z: <https://www.scribd.com/doc/46201870/15/ZLO%C5%BDENE-KOMPOZITNEMATERIALY#page=221>
- [5] CHUNG, Deborah. *Composite Materials: Science and Applications*. 2. vyd. London: Springer, 2010, 349 s. : grafy, fot. ISBN 9781848828308.
- [6] CAMPBELL, F.C. *Structural composite materials* [online]. Materials Park, Ohio: ASM International, 2010 [cit. 2016-02-19]. ISBN 978-161-3441-244. Dostupné z: [http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpSCM00001/viewerType:toc/root\\_slug:structural-composite-materials](http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpSCM00001/viewerType:toc/root_slug:structural-composite-materials)
- [7] STRONG, Brent. *History of composites - opportunities and necessities* [online]. Birmingham, 2002 [cit. 2016-02-20]. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/en/document/view/7139494/history-of-composite-materialsopportunities-dr-brent-strong>
- [8] JAMES CYRIAC, Ajith. *Metal matrix composites: History, status, factors and future*. India, 2005. Master's theses. Cochin University of Science and Technology. Vedoucí práce Dr. Jay C. Hanan.

- [9] JANOVEC, Jiří, Jiří *CEJP a Josef STEIDL*. Perspektivní materiály. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008, 143 s. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [10] KAREL MACEK, Petr. *Strojírenské materiály*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 978-800-1027-981.
- [11] CHAWLA, Krishan. Composite materials: science and engineering. 2nd ed. New York: Springer, 1998. Materials research and engineering (Unnumbered). ISBN 03-879-8409-7.
- [12] BĚHÁLEK, Luboš. Polymery [online]. Svitavy: Code Creator, 2015 [cit. 2017-11-20]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [13] Polymery. In: Publi [online]. b.r. [cit. 2017-10-25]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [14] PEEK biomaterials in trauma, orthopedic, and spinal implants. Biomaterials. 2007, 28, 4845-4869.
- [15] JANČÁŘ, Josef. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [16] VOJTĚCH, Dalibor. Kovové materiály. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0600-1.
- [17] 6. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY. In: Ústav materiálového inženýrství [online]. Praha: ČVUT, 2014 [cit. 2017-11-16]. Dostupné z: [http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6\\_kompozitni-materialy.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf)
- [18] VRBKA, Jan. Mechanika kompozitů. In: Vysoké učení technické v Brně [online]. Brno, 2008 [cit. 2017-11-16]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php?dpid=83340](https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340)
- [19] *Mechanické vlastnosti polymerů* [online]. [cit. 2006-01-10]. Dostupný z WWW:<<http://www.beltplast.cz/>>.
- [20] JARUŠEK, Jaroslav. *Metody zkoumání polymerů*. VŠCHT Pardubice, 1984



- [21] MĚŠTĀNEK, Petr. *Únavové poškozování kompozitních materiálů*. [cit. 2017-04-18]. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, 2014. Vedoucí diplomové práce Prof. Ing. Vladislav Laš, CSc.
- [22] 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.
- [23] ASKELAND, Donald R, Pradeep P FULAY a Wendelin J WRIGHT. *The science and engineering of materials*. 6th ed. Stamford, CT: Cengage Learning, c2011, xxi, 921 p. ISBN 04-956-6802-8.
- [24] MLEZIVA, Josef. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 1. vyd. Praha: Sobotáles, 1993, 525 s. ISBN 80-901-5704-1.
- [25] HAGEN, Vladislav. *Únava a stárnutí materiálu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1981.
- [26] DA COSTA, Helson M., Valéria D. RAMOS a Márcia G. DE OLIVEIRA. Degradation of polypropylene (PP) during multiple extrusions: Thermal analysis, mechanical properties and analysis of variance. *Polymer Testing*. 2007, vol. 26, issue 5, s. 676-684. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2007.04.003. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142941807000591>
- [27] *Laminační pryskyřice L285*. havel-composites.com [online]. [cit.20.04.2017].
- [28] Prepreg technologie pro výrobu uhlíkové a skelné tkaniny | FORM s.r.o.. FORM s.r.o. [online]. Copyright © 2018, FORM s.r.o. [cit. 26.04.2018]. Dostupné z: <http://www.form-composite.com/prepreg>
- [29] Havel Composites. Havel Composites [online]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html>
- [30] *Materials Science and Engineering introduction Chapter 15 Composites 7th ed.pdf: Chapter 15 Composites* [online]. 31.12.2015 [cit. 2018-05-11].
- [31] ŠUBA, Oldřich. *Mechanika polymerů a kompozitů*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Academia centrum, 2011. ISBN 978-80-7454-015-8.
- [32] Morris CJ. Composite integrated rear suspension. *Compos Struct* 1986;5 (3):233–42.

- [33] Yu WJ, Kim HC. Double tapered FRP beam for automotive suspension leaf spring. *Compos Struct* 1988;9(4):279–300.
- [34] Chen Qian, Wenku Shi, Zhiyong Chen, Shixiang Yang, Fatigue reliability design of composite leaf springs based on ply scheme optimization, State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China
- [35] Žaludek Milan, Rusnák Vladimír, Rusnáková Soňa. Účinky chemického prostředí a klimatického působení na vlastnosti kompozitu, Ústav výrobního inženýrství, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
- [36] Harry Purington, Effect of resin properties on the delamination of tapered continuous unidirectional carbon fibre composites under longitudinal tension, Department of Aerospace Engineering, University of Bristol
- [37] Senthilkumar Mouleeswaran, Design, Manufacturing and Testing of Polymer Composite Multi-Leaf Spring for Light Passenger Automobiles, Department of Mechanical Engineering, PSG College of Technology, Coimbatore/ India
- [38] KRÁL, M. Únava vlákný vyztužených kompozitů s polymerní maticí(online) Praha, 2014 [cit.2016-04-28]Prezentace. Výzkumný a zkušební letecký ústav. Dostupné z: [http://www.csm-kompozity.wz.cz/Prezentace\\_UTAM.pdf](http://www.csm-kompozity.wz.cz/Prezentace_UTAM.pdf)
- [39] Růžička, M. Hanke, M. a Rost, M.: Dynamická pevnost a životnost. Praha:Nakladatelství ČVUT,1987,212s.
- [40] REDDY, M. M., M. DEIGHTON, Rahul K. GUPTA, S. N. BHATTACHARYA a R. PARTHASARATHY. Biodegradation of oxo-biodegradable polyethylene. *Journal of Applied Polymer Science*. 2009, 111(3), 1426-1432. DOI: 10.1002/app.29073. ISSN 00218995. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/app.29073>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

PP	Polypropylen.
g	gram
$cm^3$	centimetr krychlový
MPa	Megapascal
N	Newton
°C	stupeň Celsia
$t_m$	teplota tání
$t_g$	teplota skelného přechodu
SiC	karbid křemíku
TiB <sub>2</sub>	karbid titanu
Mg	hořčík
Al	hliník
Zn	zinek
$\epsilon$	poměrné délkové prodloužení
$\sigma$	napětí
GPa	gigapascal
mm	milimetr
$\mu m$	mikrometr
Kc	Lomová houževnatost
G	Hnací síla trhliny
f	Frekvence
Hz	Hertz

---

$\sigma_a$	amplituda napětí
$\sigma_h$	horní napětí
$\sigma_d$	dolní napětí
$\sigma_m$	střední napětí
$R_e$	mez kluzu
K	stupeň Kelvina
UV	ultrafialové záření
min	minuta
cm	centimetr
L	délka
b	šířka
a	tloušťka
kW	kilowatt
kg	kilogram
kN	kilonewton
$F_{max}$	maximální síla
$\sigma_{Fmax}$	mez pevnosti v ohybu
$\varepsilon_{Fmax}$	poměrná deformace na mezi pevnosti
$y_{Fmax}$	průhyb při mezi pevnosti
$W_{Fmax}$	práce potřebná na dosažení maximální síly
Cu	Měď

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Skladba kompozitního materiálu</i> [8]. .....	13
<i>Obr. 2 Kompozitní materiál</i> [8]. .....	13
<i>Obr. 3 Rozdělení kompozitních materiálů</i> [9].....	15
<i>Obr. 4 Tekutá epoxidová pryskyřice</i> [11] .....	18
<i>Obr. 5 Varianty výztuže u výroby prepregů</i> [5] .....	20
<i>Obr. 6 Rozdělení materiálů výztuží</i> [7] .....	23
<i>Obr. 7 Graf závislosti napětí na prodloužení různých vláknových kompozitů</i> [1].....	23
<i>Obr. 8 Skelná vlákna</i> [9] .....	25
<i>Obr. 9 Technologie výroby skelného vlákna</i> [9] .....	25
<i>Obr. 10 Uhlíková vlákna</i> [9].....	26
<i>Obr. 11 Pracovní linka pro výrobu vláken PAN</i> [9].....	26
<i>Obr. 12 Kevlarová vlákna</i> [9] .....	27
<i>Obr. 13 Bórové vlákno</i> [16] .....	28
<i>Obr. 14 Rozdíl u poškození homogenních a kompozitních materiálů</i> [1].....	31
<i>Obr. 15 Rozvoj typů poškození během zkoušky u kompozitních těles</i> .....	32
<i>Obr. 16 Srovnání únavových vlastností u kompozitů</i> [1] .....	33
<i>Obr. 17 Typy a úrovně cyklického zatěžování</i> [1].....	34
<i>Obr. 18 Možné modifikace u zatěžovací křivky</i> [1].....	35
<i>Obr. 19 Diagram únavové životnosti zatěžovaný ve směru vláken</i> [22].....	36
<i>Obr. 20 Wöhlerova křivka pro srovnání polymer a ocel</i> .....	37
<i>Obr. 21 Charakteristika cyklického zatěžování</i> [1] .....	37
<i>Obr. 22 Charakteristické oblasti na Wöhlerově křivce</i> [1].....	38
<i>Obr. 23 Struktura kompozitní listové pružiny</i> [34] .....	40
<i>Obr. 24 Oblast trojúhelníku mezi kratší a delší vrstvou</i> .....	41
<i>Obr. 25 Schéma znázorňující uspořádání jednotlivých vrstev a rozložení napětí kolem rozhraní</i> [33] .....	41
<i>Obr. 26 Schéma lisování mezi vyhřívanými deskami</i> .....	46
<i>Obr. 27 Ukázka nastříhaných pásů a jednotlivých odstřížků před lisováním</i> .....	47
<i>Obr. 28 Ukázka jedné z modifikací před vložením do lisu</i> .....	47
<i>Obr. 29 Příklad lisování mezi vyhřívanými deskami</i> .....	48
<i>Obr. 30 Schéma vrstvení u nepřekládaného vzorku č.1</i> .....	49
<i>Obr. 31 Schéma vrstvení u vzorku č.2</i> .....	50

<i>Obr. 32 Schéma vrstvení u vzorku č.3 .....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 33 Ukázka nařezaných zkušebních těles .....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 34 Zkušební stroj pro statické i dynamické zatěžování Vibrophore 1000.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 35 Závislost napětí na poměrné deformaci pro vzorky č.1 .....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 36 Závislost napětí na poměrné deformaci pro vzorky č.2.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 37 Závislost napětí na poměrné deformaci pro vzorky č. 3.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 38 Grafické znázornění hodnot modulu pružnosti v tahu.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 39 Grafické znázornění hodnot maximálních sil .....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 40 Grafické znázornění hodnot mezí pevností v tahu.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 41 Jednotlivé vzorky po statických zkouškách.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 42 Průběh zatěžování je sinusový.....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 43 Wöhlerova křivka pro vzorky č.1 .....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 44 Wöhlerova křivka pro vzorky č.2.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 45 Wöhlerova křivka pro vzorky č.3.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 46 Porovnání jednotlivých vzorků při zatížení 50 % <math>F_{max}</math> .....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 47 Porovnání jednotlivých vzorků při zatížení 45 % <math>F_{max}</math> .....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 48 Porovnání jednotlivých vzorků při zatížení 40 % <math>F_{max}</math> .....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 49 Srovnání Wöhlerových křivek v závislosti zatížení na počtech cyklů.....</i>	<i>68</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1 Srovnání pevnostních charakteristik kovů a polymerních kompozitních materiálů .....</i>	12
<i>Tab. 2 Porovnání teplot zpracování a skelného přechodu u různých pryskyřic .....</i>	16
<i>Tab. 3 Mechanické vlastnosti používaných vlastností [4] .....</i>	23
<i>Tab. 4 Rozměry vzorku 1.modifikace .....</i>	49
<i>Tab. 5 Rozměry vzorku 2.modifikace .....</i>	49
<i>Tab. 6 Rozměry vzorku 3. modifikace .....</i>	50
<i>Tab. 7 Naměřená a vyhodnocená data pro vzorky č.1 .....</i>	53
<i>Tab. 8 Naměřená a vyhodnocená data pro vzorky č.2 .....</i>	55
<i>Tab. 9 Naměřena a vyhodnocená data pro vzorky č. 3 .....</i>	57
<i>Tab. 10 Výsledné hodnoty pro jednotlivé vzorky u zkoušky statického tahu .....</i>	59
<i>Tab. 11 Parametry pro zatěžování vzorků č.1 .....</i>	62
<i>Tab. 12 Parametry pro zatěžování vzorků č.2 .....</i>	62
<i>Tab. 13 Parametry pro zatěžování vzorků č.3 .....</i>	62
<i>Tab. 14 Tabulka počtu cyklů při daném zatížení pro vzorky č.1 .....</i>	63
<i>Tab. 15 Tabulka počtu cyklů při daném zatížení pro vzorky č.2 .....</i>	64
<i>Tab. 16 Tabulka počtů cyklů při daném zatížení u vzorků č.3 .....</i>	65
<i>Tab. 17 Hodnoty zatěžujících sil a počtu cyklů u jednotlivých vzorků při 50 % zatížení .....</i>	66
<i>Tab. 18 Hodnoty zatěžujících sil a počtu cyklů u jednotlivých vzorků při 45 % zatížení .....</i>	66
<i>Tab. 19 Hodnoty zatěžujících sil a počtu cyklů u jednotlivých vzorků při 40% zatížení .....</i>	67

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha PI: Materiálový list UD Deltapregu VV340



# PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST UB DELTAPREPREGU VV340U

Delta-Preg S.p.a. Uninominale  
località Benefica del Tronto  
64016 - Sant'Egidio alla Vibrata  
(TE) Italia

Telefono: [39] 0861815106  
fax: [39] 0861815691  
e-mail: info@delta-preg.it

## SCHEDA TECNICA DI PRODOTTO/PRODUCT TECHNICAL DATA SHEET

Codice Articolo/ Material code: A-PRO09106

Rev. 1.02 - 09/03/2014

### VV430U-DT806W-33 (H 124 cm)

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

Natura del formulato/ Chemical nature	Epossidico termoadesivo/ 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 -Stappaggio rapido in pressa/ Fast press moulding -Elevati requisiti estetici/ Good surface quality

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

(2) Viscosità complessiva valutata a 60°C misura di 100 Poise (frequenza 10 rad/sec) / Complex viscosity < 100 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 selledge)
Lunghezza standard/ Standard length	33 ± 3 m
Ordito (filo/ cm)/ Warp (ends/ cm)	5,50 ± 0,20
Trama (filo/ cm)/ Weft (picks/ cm)	6,30 ± 0,30
Peso areale fibra secca/ FAW	425 ± 20 g/m <sup>2</sup>
Contenuto di resina/ Resin content	33 ± 3 % in peso/ by weight
Contenuto di volatili/ Volatile content	< 1,0 % in peso/ by weight (3)
Spessore lamina/ Laminate thickness	0,340 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 o dalla presenza di difetti/ This value is indicative, may vary due to resin bleed out or material porosity in the resin laminate

(\*) Per maggiori dettagli riferirsi alle corrispondenti tabelle TDU/ For additional information please refer to the appropriate tables TDU

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